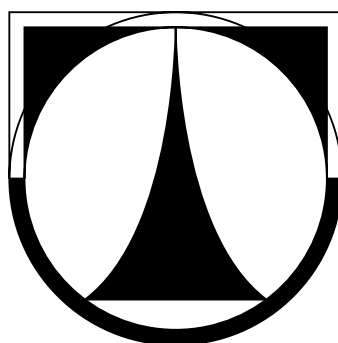


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra textilních a jednoúčelových strojů



DIZERTAČNÁ PRÁCA

Liberec 2013

Monika Hejnová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Študijný program: P2302 — Stroje a zařízení

Študijný odbor: 2302V010 — Konstrukce strojů a zařízení

Zameranie: Textilní a oděvní stroje

DIZERTAČNÁ PRÁCA

Analýza systému smyčkového dopriadania

Analysis of the loop spinning system

MONIKA HEJNOVÁ

Vedúci dizertačnej práce: prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

Konzultant: doc. Ing. Vladimír Kracík, CSc.

Rozsah práce: 105 strán

obrázkov	tabuliek	literatúry	príloh
53	18	24	0

Liberec

2013

Prehlásenie

Bola som oboznámená s tým, že na moju dizertačnú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, hlavne § 60 – školské dielo.

Beriem na vedomie, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mojich autorských práv užívaním mojej diplomovej práce pre vnútornú potrebu TUL.

Ak použijem dizertačnú prácu alebo poskytnem licenciu k jej využitiu, som si vedomá povinnosti informovať o tejto skutočnosti TUL; v tomto prípade má TUL právo odo mňa požadovať úhradu nákladov, ktoré vynaložila na vytvorenie diela, až do ich skutočnej výšky.

Dizertačnú prácu som vypracovala samostatne s použitím uvedenej literatúry a na základe konzultácií s vedúcim dizertačnej práce a konzultantom.

V Liberci 8. septembra 2013

.....

Monika Hejnová

Podakovanie

Podakovanie patrí predovšetkým vedúcemu dizertačnej práce prof. Ing. Jaroslavovi Beranovi, CSc., ktorý sa na práci podieľal svojou trpezlivosťou, cennými radami a kritickými, ale konštruktívnymi pripomienkami. Moje podakovanie patrí aj rodine a priateľom za morálnu a emocionálnu podporu.

Anotácia

Táto práca sa zaoberala analýzou systému smyčkového dopriadania. Sústredila sa na zostavenie matematických modelov a ich overenie. Stacionárny model vychádzal z pohybových rovníc zostavených v minulosti pre voľný balón. Základom pre dynamický model bol model navrhnutý pre simuláciu odvíjania priadze z valcovej cievky. Dizertačná práca pojednávala ďalej o analýzach systému smyčkového dopriadania a na ich základe bola navrhnutá optimalizácia vybraných parametrov. Experimentálne overenie stacionárneho modelu ukazovalo na výraznú zhodu výsledkov modelovania s reálnym meraním. V závere bol v predloženej dizertačnej práci navrhnutý ďalší smer výskumu v oblasti tohoto spôsobu dopriadania.

Kľúčové slová

smyčkové dopriadanie, matematické modely, obrazová analýza

Annotation

This thesis was dealing with the analysis of the loop spinning system. The focus of the thesis was to build mathematical models and their verification. The static model was based on the equations of the motion assembled to a free balloon in the past. The basis for the dynamic model was the model designed for modelling of the unwinding yarn from a cylindrical bobbin. Next, the doctor thesis was dealing with analyses of the loop spinning system and based on them proposed the optimization of selected parameters. The experimental verification of the static model indicated a strong consensus of the modelling results with the real measurements. The doctor thesis proposed the next direction of the research in the field of this spinning method at the end.

Keywords

loop spinning system, mathematical models, image analysis

Obsah

Prehlásenie	i
PodĎakovanie	ii
Anotácia	iii
Kapitola 1. Súčasný stav problematiky	3
1.1 Používané modely balónujúcej priadze	3
1.1.1 Prstencové dopriadanie – nepredlžiteľná priadza	3
1.1.2 Prstencové dopriadanie – predlžiteľná priadza	10
1.1.3 Odvíjanie priadze z valcovej cievky – nepredlžiteľná priadza .	18
1.2 Konštrukčné usporiadanie systému smyčkového dopriadania	23
1.2.1 Varianty usporiadania systému, patenty	27
Kapitola 2. Teoretická časť	31
2.1 Matematické modely smyčkového dopriadania	31
2.1.1 Stacionárny model	31
2.1.2 Dynamický model	43
2.2 Uživateľské rozhranie pre modelovanie a analýzu	53
2.3 Porovnanie smyčkového a prstencového systému dopriadania	55
2.3.1 Analýza vplyvu zmeny polomeru navíjania	55
2.3.2 Analýza vplyvu zmeny jemností vypriadaných priadzí	56
2.3.3 Analýza vplyvu koeficientu zákrutu	62
2.4 Analýza smyčkového dopriadania	63
2.4.1 Analýza vplyvu zmeny polomera hornej valcovej časti obme- dzovača	66

2.4.2	Analýza vplyvu zmeny dĺžky valcovej časti obmedzovača	66
2.4.3	Analýza vplyvu vysunutia statického prstenca	67
2.4.4	Analýza vplyvu koeficientu trenia na prstenci	69
2.4.5	Analýza vplyvu pomeru otáčok smyčky a obmedzovača	72
2.4.6	Analýza vplyvu zmeny polomeru navíjania pre rôzne jemnosti	76
2.4.7	Teoretické maximálne otáčky vretena a obmedzovača	77
2.5	Výsledky analýz a návrhy na optimálne prevádzkovanie zariadenia	81
2.5.1	Zhrnutie výsledkov analýz	82
2.5.2	Doporučenia k optimálnej prevádzke zariadenia	84
2.5.3	Ekonomické aspekty	85
2.6	Porovnanie vretenových a prstencových priadzí	86
Kapitola 3. Experimentálna časť		89
3.1	Metodika verifikácie matematických modelov balónujúcej priadze	89
3.2	Overenie zostavených modelov	94
3.2.1	Experiment	98
3.2.2	Analýza obrazu	99
3.2.3	Simulácia pomocou počítačového modelu	101
3.2.4	Porovnanie výsledkov	102
Kapitola 4. Ďalší postup riešenia		103
4.1	Teoretická časť	103
4.2	Praktická časť	103
Literatúra		106

Zoznam symbolov

Symbol	Jednotka	Význam
A		matica kalibračných bodov
$A(k)$		matica s k -tým snímkom
a_i, b_i, c_i		polohový vektor i -teho elementu
am	$\text{ktex}^{2/3} \text{ m}^{-1}$	zákrutový koeficient
b		vektor kalibračných bodov
civ	N	sila zahrňujúca smykovú silu a reakciu obmedzovača
C_t, C_n	—	bezrozmerný súčiniteľ odporu vzduchu
dl	m	dĺžka pôvodného elementu priadze
d_n	m	priemer navíjania
ds	m	dĺžka zaťaženého elementu priadze
D	m	priemer priadze
$D(k)$		matica rozdielov snímkov
e		vektor poskytujúci informáciu o chybe transformácie
f	N	navíjacia sila
f_0	—	súčiniteľ smykového trenia medzi priadzou a vodiacim očkom
f_1	—	súčiniteľ smykového trenia medzi priadzou a obmedzo- vačom
F_{\max}	N	maximálna ťahová sila v priadzi
F_N	N m^{-1}	normálová zložka reakcie z obmedzovača
F_{Nr}, F_{Nz}	N m^{-1}	zložky normálovej reakcie
F_o	N m^{-1}	odpor vzduchu
$F_{or}, F_{o\varphi}, F_{oz}$	N m^{-1}	zložky odporu vzduchu
F_{ot}, F_{on}	N m^{-1}	zložky odporu vzduchu

F_S	N m^{-1}	smyková zložka reakcie z obmedzovača
$F_{Sr}, F_{S\varphi}, F_{Sz}$	N m^{-1}	zložky smykovej reakcie
\mathbf{F}_v	N	výsledná vonkajšia sila
g	m s^{-2}	tiažové zrýchlenie
h	m	konštrukčný rozmer anuloida v smere osi z
h_1	m	vzdialenosť dolnej hrany hornej valcovej časti obmedzovača od vodiaceho oka
h_2	m	vzdialenosť horného okraja anuloidovej plochy od vodiaceho oka
h_3	m	vzdialenosť horného okraja valcovej plochy od vodiaceho oka
h_4	m	vzdialenosť spodnej hrany obmedzovača od vodiaceho oka
l	m	dĺžka nezataženej priadze
l_e	m	dĺžka vektora daného súradnicami a_i, b_i, c_i , dĺžka elementu
n	—	počet elementov, bodov
\mathbf{n}		jednotkový vektor normály ku krivke balónujúcej priadze
\mathbf{n}_0		vektor normály k ploche tvoriacej povrch obmedzovača
n_s	s^{-1}	otáčky smyčky
n_v	s^{-1}	otáčky vretien
O		počiatok súradnicového systému
$Or\varphi z$		systém cylindrických súradníc
$Oxyz$		súradnicový systém
PZ	m s^{-2}	predpísané zrýchlenie
\mathbf{p}	px	súradnice bodu
p	—	parameter popisujúci pomer otáčok smyčky a obmedzovača
R	N m^{-1}	reakcia na priadzu z obmedzovača vztiahnutá na jednotku dĺžky priadze
\mathbf{r}	m	súradnice bodu
$\mathbf{r}_0, \varphi_0, \mathbf{z}_0$		jednotkové vektory súradnicových os

r_0	m	polomer vodiaceho očka
r_1	m	polomer hornej valcovej časti obmedzovača
r_2	m	polomer valcovej časti obmedzovača
r_{\max}	m	maximálny polomer balónujúcej priadze
r_n	m	polomer navíjania na cievku
s	m	dĺžka priadze v balóne
s_A	m	celková dĺžka balónujúcej priadze medzi vodiacim očkom miestom navíjania
s_1	m	dĺžka priadze v balóne medzi vodiacim očkom a obmedzovačom
s_2	m	dĺžka priadze v balóne medzi vodiacim očkom a dolnou hranou hornej valcovej časti obmedzovača
s_3	m	dĺžka priadze v balóne medzi vodiacim očkom a miestom, kde obmedzovač prechádza z anuloidovej plochy na druhú valcovú časť
s_4	m	dĺžka priadze v balóne medzi vodiacim očkom a miestom, kde obmedzovač prechádza z anuloidovej plochy na valcovú časť
s_5	m	dĺžka priadze v balóne medzi vodiacim očkom a dolnou hranou obmedzovača
\mathbf{t}		jednotkový vektor dotyčnice ku krivke balónujúcej priadze
t	s	čas
T	N	ťahová sila v priadzi
\mathbf{T}		transformačná matica
\mathbf{T}^{-1}		inverzná transformačná matica
T_0	N	hodnota ťahovej sily v mieste, kde priadza opúšťa vodiace očko
T_s		ťahová sila nad vodiacim očkom
\mathbf{v}	m s^{-1}	vektor rýchlosti priadze
\mathbf{v}_{pr}	m s^{-1}	predpísaná rýchlosť
v_t, v_n	m s^{-1}	dotyčnicová a normálová zložka vektora rýchlosti priadze
v_u	m s^{-1}	unášivá rýchlosť priadze

\mathbf{v}_z	m s^{-1}	požadovaná rýchlosť
w	m s^{-1}	podávacia rýchlosť, relatívna rýchlosť priadze
\mathbf{x}		vektor obsahujúci neznáme koeficienty lineárnej transformácie
$\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b, \mathbf{x}_c$		matica transformácie všeobecných súradníc
Z	m^{-1}	zákrut
α	rad	uhol sklonu steny kužela
β	rad	uhol opásania na vodiacom očku
β_{res}	N m^{-1}	odpor vzduchu
η	—	stupeň zosúkania
λ_i		Lagrangeove multiplikátory
μ_0	tex	jemnosť priadze
ϱ	kg m^{-3}	merná hmotnosť vzduchu
σ	m	polomer krivosti povrchu anuloida
ω	rad s^{-1}	uhlová rýchlosť
ω_{om}	rad s^{-1}	uhlová rýchlosť obmedzovača
ω_s	rad s^{-1}	uhlová rýchlosť smyčky

Úvod

Medzi najpoužívanejšie spôsoby systému dopriadania patrí prstencové dopriadanie [18]. V súčasnej dobe je už však na hraniciach svojích technologických možností, a preto sa hľadajú nové systémy, ktoré by zvýšili predovšetkým maximálne hodnoty výrobnosti (a s tým súvisacích rýchlostí dopriadania). V systéme, ktorý skúmame, je odstránený hlavný faktor obmedzujúci zvyšovanie rýchlostí, a to je bežec. V tomto systéme dopriadania však hraje významnú úlohu jav, ktorý figuruje pri prstencovom dopriadaní – balónovanie priaze. Nazýva sa preto smyčkové dopriadanie.

Balón je rotačná plocha, ktorá vzniká pri rotácii priadze okolo pevnej osi v priestore (navíjanie, odvíjanie, atp.). Každý element priadze totiž pri týchto procesoch podlieha zaťaženiu všeobecnou sústavou síl. Táto sústava predstavuje spojité zaťaženie rozložené pozdĺž celej dĺžky priadze. Ide napríklad o pole odstredivých síl, tiažových síl atď. Zložitá priestorová krivka priadze je vytvorená v dôsledku ventilačných odporov a Coriolisových síl.

Štúdium balóna a balónujúcej priadze je veľmi dôležité v konštrukcii a vo vývoji dopriadacích strojov, pretože veľkosť cievky a rozmery stroja sú závislé na tvare balóna, ktorý sa zmení, ak zmeníme prevádzkové podmienky, nadmerný ťah priadze môže spôsobiť jej pretrhnutie, balónovanie priadze môže byť limitujúcim faktorom zvyšovania výkonu stroja a navyše balónujúca priadza je zdrojom silového pôsobenia na sústavu prstenec – bežec.

Predložená dizertačná práca má tri časti – prvá časť je uvedená súčasným stavom problematiky a pojednáva o konštrukčnom usporiadaní skúmaného zariadenia, práca ďalej obsahuje teoretickú a experimentálnu časť. Teoretická časť sa venuje zostaveniu jednotlivých modelov a predpokladom, za ktorých je daný problém riešený. Pojednáva tiež o urobených analýzach a výsledkoch, ktoré sa premietajú v navrhutej optimalizácii systému. Praktická časť sa venuje experimentálnemu overeniu modelov.

Cieľ práce

Cieľom dizertačnej práce je analýza smyčkového systému dopriadania. Na jej základe bude navrhnutá optimalizácia parametrov smyčkového dopriadania. Prostredníctvom numerickej simulácie vysokorychlostného procesu navíjania bude stanovený tvar krivky rotujúcej priadze medzi stiskovou líniou valčekov priťahového ústrojenstva a miestom navíjania priadze na dutinku a bude určený priebeh ťahovej sily v priadzi v tomto úseku. Zostavený stacionárny matematický model bude následne slúžiť na analýzu vybraných okrajových podmienok, pri návrhu optimalizácie parametrov a na stanovenie teoretických limitov skúmaného dopriadacieho procesu. Dynamický model bude zostavený za účelom analýzy vplyvu nestabilit na systém smyčkového dopriadania. Bude vypracovaná metodika overenia matematických modelov a budú zvolené vhodné parametre samotného experimentu. Získané výsledky budú porovnané s výsledkami matematického modelovania.

Kapitola 1

Súčasný stav problematiky

V tejto kapitole bude analyzovaný súčasný stav výskumu v oblasti balónovania priadze a stav techniky v oblasti vývoja smyčkového dopriadania. V prvom rade sa zameriame na modely balónujúcej priadze (ktoré sú v súčasnosti zostavené a overené), potom na konštrukciu skúmaného systému a na jej varianty.

1.1 Používané modely balónujúcej priadze

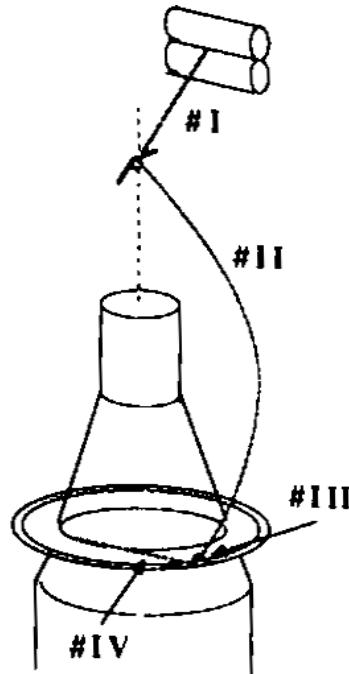
Ako už bolo spomenuté, u smyčkového dopriadania figuruje jav nazvaný balónovanie priadze. Všeobecne je možné k modelovaniu balónujúcej priadze pristúpiť z rôznych hľadísk. Napríklad podľa vlastností modelovaného objektu môžeme využiť princípy mechaniky tuhého resp. deformovateľného telesa.

Problematikou skúmania balónujúcej priadze sa zaoberalo niekoľko autorov, napr. Fraser, Batra, Kothari, Clark, Tang, Barr atď. V tejto časti úvodnej kapitoly sa budeme venovať trom vybraným modelom, ktoré boli zverejnené v dostupnej literatúre.

1.1.1 Prstencové dopriadanie – nepredĺžiteľná priadza

Batra a kol. rozdelil riešenie modelu voľne balónujúcej priadze na dve časti. V časti I v článku [4] nepočíta s vplyvom odporu vzduchu, gravitáciou ani s Coriolisovým zrýchlením. V časti II [5] zohľadňuje vplyv odporu vzduchu na balónujúcu priadzu. Výsledkom jeho modelov je, že dokáže predikovať ťahovú silu v priadzi pozdĺž celej jej dĺžky a tiež je možné stanoviť hmotnosť bežca.

Zariadenie pre prstencové dopriadanie rozdelil autor na štyri oblasti (obr. 1.1). Prvá oblasť je medzi valčekami priťahového ústrojenstva a vodiacim očkom, druhá oblasť je medzi vodiacim očkom a prstencom, tretia oblasť popisuje silové pomery na bežci a štvrtá oblasť je medzi bežcom a miestom navíjania na cievku.



Obr. 1.1: Určenie oblastí pre výpočtový model [4]

Oblasť I je z hľadiska balónovania priadze nezaujímavá (priadza je napnutá a nedochádza k vytvoreniu balóna), preto sa autor venuje až oblasti II.

Pre svoj model zavádza Batra súradnicový systém $Oxyz$, kde O je vo vodiacom očku a os z je totožná s osou cievky a orientovaná smerom nadol. Zavádza tiež pohybujúci sa súradnicový systém $Ox'y'z$ s počiatkom vo vodiacom očku a rotujúci okolo osi z . Predpokladá kvázistacionárny stav, čo znamená, že tvar krivky priadze je na čas nezávislý. Ku každému bodu krivky môžeme určiť jednotkové vektory: dotyčnicový \mathbf{e}_t , normálový \mathbf{e}_n a binormálový \mathbf{e}_b alebo môžeme uvažovať cylindrický súradnicový systém definovaný jednotkovými vektormi \mathbf{e}_r (radiálny smer), \mathbf{e}_φ (obvodový), \mathbf{e}_z (rovnobežný s osou cievky). Ďalej uvažuje nekonečne malý segment priadze dĺžky ds o hmotnosti $dM = Mds$, ktorého poloha je daná vektorom \mathbf{q} . M je jemnosť priadze.

Všeobecná pohybová rovnica tohoto segmentu je $\mathbf{a}dM = \sum d\mathbf{F}$, kde \mathbf{a} je abso-

lútne zrýchlenie segmentu vo vzťažnej súradnicovej sústave a $\sum d\mathbf{F}$ je suma všetkých vonkajších síl, ktoré na segment pôsobia. Zrýchlenie \mathbf{a} rozloží na jednotlivé komponenty (podľa zákonov fyziky) $\mathbf{a} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_r + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{q}) + \mathbf{a} \times \mathbf{q}$, kde \mathbf{a}_0 je zrýchlenie pohyblivej súradnicovej sústavy vzhľadom k vzťažnej, $\mathbf{v}_r = d\mathbf{q}/dt$, \mathbf{a}_r sú rýchlosť a zrýchlenie segmentu (v pohyblivom súradnicovom systéme), $\boldsymbol{\omega}$ je uhlová rýchlosť pohyblivého súradnicového systému voči vzťažnému systému, \mathbf{a} je uhlové zrýchlenie, \mathbf{q} je polohový vektor segmentu v pohyblivom súradnicovom systéme.

V kvazistacionárnom prípade je $\mathbf{a}_0 = 0$, $\boldsymbol{\omega}$ a \mathbf{v}_r sú konštantné a $\mathbf{a} = 0$. Zrýchlenie \mathbf{a}_r má 3 zložky: pretože je navíjacia rýchlosť konštantná, je dotyčnicová zložka nulová a ostatné dve zložky budú tiež nulové, pretože zakrivenie priestorovej krivky, reprezentujúcej tvar priadze, je v oboch týchto smeroch malé. Preto je potom možné zapísať: $\mathbf{a} = 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{q})$, kde $2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r$ je Coriolisovo zrýchlenie. Platí, že $\mathbf{e}_t = d\mathbf{q}/ds = dr/ds\mathbf{e}_r + r d\varphi/ds\mathbf{e}_\varphi + dz/ds\mathbf{e}_z$.

Autor zavádza predpoklad nepredlžiteľnej, dokonale ohybnej priadze. Vonkajšie sily pôsobiace na priadzu sú: ťah priadze $\mathbf{T} = T\mathbf{e}_t$ a odpor vzduchu \mathbf{A} . Odpor vzduchu závisí na relatívnej rýchlosti vzduchu vzhľadom k priadzi pozdĺž jej osi (\mathbf{e}_t) a na kolmej zložke ku krivke priadze. Praktické výsledky ukazujú na to, že zatiaľ čo odpor vzduchu sa stáva významným pri vysokých rotačných rýchlostiach, jeho tangenciálne zložky sú zanedbateľné. Všeobecná pohybová rovnica má tvar (1.1).

$$dM = [2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{q})] M ds = d\mathbf{T} + d\mathbf{A} \quad (1.1)$$

Po úprave má zložka rovnice (1.1) pozdĺž \mathbf{e}_t tvar $-\omega M r dr = dT$ a po ingerácii $T = T_0 - (\omega^2 M r^2/2)$, kde T_0 je ťah v očku. Autor ďalej vyjadruje rovnicu v bezrozmernom tvare (1.2), kde $R = r/r_0$, $P^2 = M\omega^2 r_0^2/T_0$.

$$T/T_0 = (1 - P^2 R^2/2) \quad (1.2)$$

Pre určenie tvaru balóna vyjadří Batra najprv rovnicu (1.1) v polárnych súradniciach (1.3), kde $d\mathbf{T} (dT_r, dT_\varphi, dT_z)$ a $d\mathbf{A} (dA_r, dA_\varphi, dA_z)$ predstavujú zložky vektorov.

$$\begin{aligned} (-2\omega v r d\varphi/ds - \omega^2 r) M ds &= dT_r + dA_r \\ (2\omega v) M dr &= dT_\varphi + dA_\varphi \\ 0 &= dT_z + dA_z \end{aligned} \quad (1.3)$$

Za určitých predpokladov zanedbá autor vplyv Coriolisovho zrýchlenia a pre prípad nulového odporu vzduchu dostane rovnice (1.4).

$$\begin{aligned} (-\omega^2 r) M ds &= dT_r \\ 0 &= dT_\varphi \\ 0 &= dT_z \end{aligned} \tag{1.4}$$

Z týchto rovníc vyplýva, že T_z a T_φ sú v oblasti II konštantné pozdĺž celej dĺžky priadze. Toto spoločne s rovnicou $\mathbf{T} = T_r \mathbf{e}_r + T_\varphi \mathbf{e}_\varphi + T_z \mathbf{e}_z = T \mathbf{e}_t = T dr/ds \mathbf{e}_r + T r d\varphi/ds \mathbf{e}_\varphi + T dz/ds \mathbf{e}_z$ vedie k (1.5) a $T_r = T_z dr/dz$.

$$T_\varphi = T_z r d\varphi/dz \tag{1.5}$$

Rovnica (1.5) ukazuje, že pre $r = 0$ je $T_\varphi = 0$ a keďže $T_\varphi = \text{konšt.}$ pre každé r , musí byť nulové $d\varphi/dz = 0$. Takže priadzový balón vytvára v prípade nulového odporu vzduchu krivku v rovine rz .

Ďalším upravovaním rovníc dôjde autor k bezrozmernému zápisu nelineárnej diferenciálnej rovnice druhého rádu $R_{,ZZ} = -a (P^2 R/L^2) [1 + R_{,Z}^2 L^2]^{1/2}$, kde $Z = z/h$, $L = r_0/h$ je štíhlostný pomer balóna a h označuje výšku balóna, $r_{,z} = dr/dz$, $R_{,Z} = r_{,z}/r_0$.

Po stanovení okrajových podmienok (v očku a na prstenci) a pri využití rovnice (1.2) je možné zapísať $T_z/T_0 = (1 - 0,5 P^2 R_M^2)$, kde $R_M = r_M/r_0$ a r_M je hodnota maximálneho polomeru balóna. Tento bezrozmerný zápis je zmysluplný tiež fyzikálne, pretože umožňuje štúdium vplyvu odporu vzduchu, zotrvačných síl a výšky balóna na jeho tvar v jednom normalizovanom grafe.

Rozmery bežca sú malé, takže je možné ho modelovať ako hmotný bod (o hmotnosti m) pohybujúci sa po prstenci (polomer r_0) konštantnou uhlovou rýchlosťou ω . Sily pôsobiace na bežec sú ťah priadze T_1 (z oblasti II) a T_2 (z oblasti IV), reakcia N v rovine rz a smyková sila F pôsobiaca dotýčnicovo v rovine prstenca. Pohybová rovnica bežca môže byť potom zapísaná ako (1.6).

$$-m\omega^2 r_0 \mathbf{e}_r = \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 + \mathbf{N} + \mathbf{F} \tag{1.6}$$

T_1 je dané rovnicou (1.2) a vzťah medzi T_1 a T_2 je možné vyjadriť pomocou Eulerovej rovnice ako (1.7), kde α je uhol opásania a μ je koeficient trenia medzi priadzou a bežcom.

$$T_2 = T_1 e^{\mu \varphi} \tag{1.7}$$

Po zavedení úprav dostane autor rovnice (1.8) a (1.9), kde $g = e^{\mu_y \alpha}$ a $m\omega^2 r_0$ predstavuje odstredivú silu bežca na prstenci a je zavedený bezrozmerný parameter C .

$$C = m\omega^2 r_0 / T_0 = [t_r + g \cos \delta_0 + t_z \cot \nu] (1 - P^2/2) \quad (1.8)$$

$$\sin \nu = t_z \mu_r / (g \sin \delta_0 - t_\varphi) \quad (1.9)$$

Okrem vyššie spomínaných predpokladov predpokladá autor pri skúmaní oblasti III a IV, že bežec, prstenec a bod navíjania sú v tej istej horizontálnej rovine. Zavádza súradnicovú sústavu x, y, z , kde je os z orientovaná smerom dolu a počiatok je v strede prstenca. Rotujúca súradnicová sústava x', y', z je súosá so systémom x, y, z a rotuje konštantnou uhlovou rýchlosťou bežca ω .

Autor predpokladá element priadze (dĺžka ds , jemnosť M), určený polohovým vektorom $\mathbf{r} = r\mathbf{e}_r$. Pohybuje sa pozdĺž krivky priadze navíjacou rýchlosťou $\mathbf{v} = v\mathbf{e}_t$, kde $\mathbf{e}_t = (dr/ds)\mathbf{e}_r + r(d\varphi/ds)\mathbf{e}_\varphi$ a kde \mathbf{e}_r a \mathbf{e}_φ sú jednotkové vektory polárneho súradnicového systému. Zrýchlenie elementu vrátane Coriolisovho zrýchlenia je potom $\mathbf{a} = -\omega^2 r r_{,s} \mathbf{e}_t + (2\omega v + \omega^2 r^2 \varphi_{,s}) \mathbf{e}_n$.

Po zanedbaní odporu vzduchu sú pohybové rovnice elementu vo vektorovej podobe $\mathbf{a}Mds = d\mathbf{T}$ a $d\mathbf{T} = (\partial T/\partial s) \mathbf{e}_t ds + T\kappa \mathbf{e}_n ds$, kde κ je krivosť krivky priadze. Autor zavedie bezrozmerné veličiny $R = r/r_0$, $H = s/r_0$, $P_2^2 = \omega^2 M r_0^2 / T_2$ a pohybové rovnice je možné zapísať v tvare $-P_2^2 R R_{,H} \mathbf{e}_t + (2V P_2^2 + P_2^2 R^2 \varphi_{,H}) \mathbf{e}_n = (\partial \tau / \partial H) \mathbf{e}_t + \tau \kappa \mathbf{e}_n$, kde $\tau = T/T_2$, $V = v/\omega r_0$. Po úpravách získa Batra vzťah $\tau = [1 + P_2^2 (1 - R^2) / 2]$. Táto rovnica ukazuje, že ťah priadze v oblasti IV nie je priamo závislý na Coriolisovom zrýchlení. Ťah rastie s klesajúcim polomerom R od 1 (T_2) na bežci na maximálnu hodnotu $\tau_b (= T_b/T_2)$ v bode navíjania a je daný vzťahom $\tau_b = [1 + P_2^2 (1 - R_b^2) / 2]$, kde $R_b = r_b/r_0$ reprezentuje momentálny polomer r_b navíjania na cievke. Rozdiel $T_b - T_2$ je najväčší, keď je priadza navíjaná na plnú cievku a takmer nulový na cievke, pretože tu je $R_b = 1$. Skalárna rovnica v smere normály je (1.10).

$$2V P_2^2 + P_2^2 R^2 \varphi_{,H} = \kappa [1 + P_2^2 (1 - R^2) / 2] \quad (1.10)$$

Subashi ďalej uvádza, že krivka medzi bežcom a bodom navíjania je pre všetky praktické aplikácie priamka v takmer všetkých prípadoch.

Predpokladá sa, že pre analýzu oblasti II je známa ťahová sila T_0 . V analýze oblasti III sa predpokladá, že je známa sila T_1 . Jej hodnota sa vypočíta zo vzťahu

(1.2) a závisí na T_0 . Rovnica (1.8), riešenie analýzy oblasti III, ukazuje, že na stanovenie dynamickej rovnováhy musí byť hmotnosť bežca závislá nielen na ťahovej sile T_0 v očku, ale tiež na t_r a t_z odvodených z riešenia oblasti II a na uhle δ_0 z riešenia analýzy oblasti III. V oblasti IV sa predpokladá znalosť T_2 . V skutočnosti je vypočítané z rovnice (1.7), ktorá súvisí s riešením oblasti II.

Na získanie kompletného riešenia problému vo všetkých troch oblastiach je nutné riešiť všetky rovnice súčasne. Výpočet urobil autor pre bežne používané parametre prstencového dopriadania. Pomocou analýzy predikuje z dynamickej rovnováhy hmotnosť bežca, tvar balóna a maximálnu ťahovú silu v bode navíjania. Výsledky prezentuje pre hodnoty $P = 0,287$ a $L = 0,5; 0,179; 0,071; 0,05$.

Pre rovnaký polomer prstenca a klesajúcim L rastie výška priadzového balóna. Z výsledkov vyplýva, že balón pre $L = 0,5$ a $0,179$ má maximálny polomer na prstenci. Pre $L = 0,071$ a $0,05$ dochádza k zborteniu balóna. Určiť hmotnosť bežca a maximálnu ťahovú silu nemá podľa autora význam v prípade, že neuvažujeme odpor vzduchu.

V prvej časti modelovania nebol do výpočtov zahrnutý vplyv odporu vzduchu ani Coriolisovo zrýchlenie. Druhá časť [5] počíta s odporom vzduchu. Všetky symboly, terminológia a predpoklady uvedené v časti I platia aj pre túto časť.

V prvej časti [4] bolo dokázané, že ťah priadze nie je priamo závislý na odpore vzduchu, ale závisí na polomere balóna r a jeho maximum v tejto oblasti je T_0 . Na základe toho sa teda ťahová sila počíta podľa vzťahu (1.2).

Na určenie tvaru balóna s odporom vzduchu sa autor vrátil k rovnici (1.3). Po zahrnutí odporu vzduchu platí $-\omega^2 r M d\mathbf{s}\mathbf{e}_r = d\mathbf{T} + d\mathbf{A}$.

Rozloženie sily odporu vzduchu $d\mathbf{A}$ je uvažované tak, že zodpovedá obvodovej rýchlosti $\omega r \mathbf{e}_\varphi$, ktorá ma jednu zložku v smere \mathbf{e}_t a druhú v smere \mathbf{e}_m (v jednej rovine s \mathbf{e}_t a \mathbf{e}_φ) kolmej na priadzu.

Zložka v smere \mathbf{e}_t súvisí s povrchovým trením, ktoré je, ako už bolo spomínané skôr, zanedbateľné. Zložka v smere \mathbf{e}_m vytvára normálovú odporovú silu. Po dosadení a úpravách autor dostane bezrozmernú formu pohybových rovníc (1.11), (1.12) a (1.13), kde $Q^2 = D\omega^2 r_0^3 / T_0$ reprezentuje pomer odporu vzduchu ku ťahu priadze

a $S = s/h$.

$$-P^2 R = (1 - P^2 R^2/2) L^2 R_{,SS} - P^2 L^2 R R_{,S}^2 - L^2 (1 - P^2 R^2/2) R \varphi_{,S}^2 + Q^2 L^2 R^3 R_{,S} \varphi_{,S} (1 - L^2 R^2 \varphi_{,S}^2)^{1/2} \quad (1.11)$$

$$0 = (1 - P^2 R^2/2) L^2 R \varphi_{,SS} - P^2 L^2 R^2 R_{,S} \varphi_{,S} + 2L^2 (1 - P^2 R^2/2) R_{,S} \varphi_{,S}^2 - Q^2 R^2 (1 - L^2 R^2 \varphi_{,S}^2)^{3/2} \quad (1.12)$$

$$0 = (1 - P^2 R^2/2) Z_{,SS} - P^2 R R_{,S} Z_{,S} + Q^2 R^3 Z_{,S} \varphi_{,S} (1 - L^2 R^2 \varphi_{,S}^2)^{1/2} \quad (1.13)$$

Pohybové rovnice bežca sú bežne považované za nezávislé na odpore vzduchu. Autor urobil teda rovnaký predpoklad a na výpočet využil rovnice (1.8) a (1.9).

Ak vezmeme do úvahy odpor vzduchu, pohybová rovnica z prvej časti modelovania bude mať v oblasti IV podobu $-M\omega^2 r r_{,s} \mathbf{e}_t + M(2\omega v + \omega^2 r^2 \varphi_{,s}) \mathbf{e}_n = (\partial T/\partial s) \mathbf{e}_t + (T\kappa + D\omega^2 r^2 r_{,s}^2) \mathbf{e}_n$. Rovnica (1.10) má potom tvar $2VP_2^2 + P_2^2 R^2 \varphi_{,H} = \kappa [1 + P_2^2 (1 - R^2)/2] + Q_2^2 R^2 R_{,H}^2$, kde $Q_2^2 = \omega^2 D r_0^3/T_2$. Riešenie tejto rovnice s ohľadom na okrajové podmienky uvedené v prvej časti vedie na stanovenie tvaru balóna v oblasti IV. Podobne, ako predtým, uvažuje Batra krivku priadze ako priamku vedenú dotyčnicovo k bodu náviny na cievku.

Na určenie hodnoty Q v rovniciach (1.11) až (1.13) je potrebné poznať parameter D . Parameter D závisí na relatívnej rýchlosti (resp. na Reynoldsovom čísle Re) prúdu vzduchu pohybujúceho sa proti nej. Za predpokladu, že vzduch je stacionárny, je relatívna rýchlosť vzduchu rovná obvodovej rýchlosti priadze a mení sa bod po bode pozdĺž krivky priadze. Takže D a tým pádom aj Q je funkciou dĺžky priadze v balóne.

Autor predpokladá, že odpor vzduchu je maximálny v mieste, kde je maximálna obvodová rýchlosť priadze. Je to na maximálnom polomere balóna. Určí si hodnotu maximálneho polomeru balóna r_M a spočíta rýchlosť v_M (maximálna rýchlosť balóna) a Re . Z grafu závislosti C_d na Re odčíta zodpovedajúcu hodnotu C_d (súčiniteľ odporu vzduchu). Spočíta Q a predpokladá jeho hodnotu pre celú dĺžku priadze v balóne.

Riešenie rovníc bolo urobené pre hodnoty štihlостného pomeru $L = 0,5; 0,179; 0,109; 0,071; 0,057; 0,050$. Bolo určené rozloženie ťahovej sily pozdĺž krivky priadze v oblasti II. Takto je určený pomer T_1/T_0 a zložky dotyčnicového vektora potrebné na riešenie pohybových rovníc bežca. Na výpočet hmotnosti bežca potrebnej pre dynamickú rovnováhu je potrebné, okrem vyššie uvedených informácií, poznať hodnoty μ_r a g . Autorom boli prevzaté z literatúry: $\mu_r = 0,1$ a $g = 1,7$.

V praxi je priadza dopriadaná na zariadení s konštantnými otáčkami vretena a s fixnou hmotnosťou bežca. Autora zaujímajú hodnoty ťahu priadze v očku a v bode návínu.

Z výsledkov autorových výpočtov vyplýva, že profily balónujúcej priadze v meridiánovej rovine ukazujú, že odpor vzduchu eliminuje zbortenie na nenulovej hodnote polomeru balóna, aj keď čiastočné zbortenie sa vyskytuje, ak klesne L pod hodnotu zhruba 0,109. Všeobecne platí, že klesajúce L vedie k významným zmenám v tvare balóna.

Pre daný pomer hmotnosti bežca k jemnosti priadze, pre konštantný pomer odporu vzduchu k dynamickým silám a konštantnú hodnotu rotačnej rýchlosti bežca vychádza, že keď výška balóna rastie (L klesá), rastie ťah v očku, ale nie rovnomerne (kolísá). Kolísanie vyplýva z čiastočného zbortenia balóna.

Na záver je možné povedať, že autor ukázal, že je možné predikovať zmeny ťahu v očku a ďalej jeho hodnoty pozdĺž krivky priadze pre danú sústavu procesných parametrov. Podľa autora môžu byť tieto analýzy použité ako nástroj pre diagnostiku a kontrolu dynamických procesov, rovnako ako aj pre návrh zariadenia. Numerické metódy môžu byť ďalej použité pre analýzy odvíjania priadze.

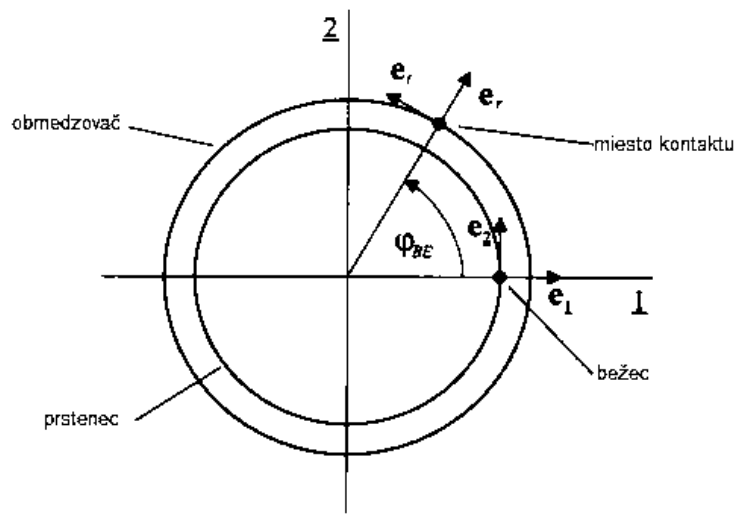
1.1.2 Prstencové dopriadanie – predlžiteľná priadza

Cieľom dizertačnej práce [24] bolo popísať nestacionárne časové a priestorové priebehy silne deformovateľného jednodimenzionálneho kontinua pomocou všeobecného mechanicko-matematického modelu s ohľadom na jeho ohybovú a torznú tuhosť.

Weiss podopiera svoj model konkrétnymi príkladmi, ale výsledky nemá experimentálne overené.

Priadza je modelovaná ako jednodimenzionálne kontinuum s rovnomerným kruhovým prierezom. Z kruhového prierezu vyplýva, že priečna deformácia ako aj rotačná zotrvačnosť prierezov sú zanedbateľné, takže ako základ budú položené pohybové rovnice pre Euler-Bernouliho nosník v tvare $\varrho A \ddot{\mathbf{r}} = \left(EA \left(\sqrt{\mathbf{r}'^T \mathbf{r}'} - 1 \right) \frac{\mathbf{r}'}{\sqrt{\mathbf{r}'^T \mathbf{r}'}} \right)' + \left(E I \mathbf{S}_{\mathbf{r}'} \mathbf{S}_{\mathbf{r}'}' \left(\frac{\mathbf{r}'''}{(\mathbf{r}'^T \mathbf{r}')^2} - 2 \frac{(\mathbf{r}'^T \mathbf{r}'') \mathbf{r}''}{(\mathbf{r}'^T \mathbf{r}')^3} \right) + G I_T \vartheta \frac{\mathbf{S}_{\mathbf{r}'} \mathbf{r}''}{(\mathbf{r}'^T \mathbf{r}')^{3/2}} \right)' + \mathbf{q}$, kde ϱA je jemnosť priadze, E je Youngov modul pružnosti v ťahu, A je plocha prierezu, I je kvadratický moment prierezu, EI je ohybová tuhosť, GI je tuhosť v krute, \mathbf{r} je polohový vektor, \mathbf{S} je antisymetrická matica, ktorá obsahuje prvky vektora \mathbf{r} a $()' = \frac{\partial}{\partial s}$.

Na výpočet stacionárneho tvaru je vhodné použiť rotujúci súradnicový systém s bázovými vektormi $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ na prstencovej lavici (smer 3 je pri tom vertikálny). Súradnicový systém môže byť považovaný za inerciálny, pričom zýchlenia vyskytujúce sa vďaka zdvihu prstencovej lavice sú zanedbateľne malé. Relatívne k tomuto súradnicovému systému bude zavedený súradnicový systém s bázovými vektormi $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$, ktorý rotuje okolo osi 3 s konštantnou rotačnou rýchlosťou Ω_L . Súradnicový systém je usporiadaný tak, že bežec stále leží na kladnej osi 1 (obr. 1.2). Na prevod



Obr. 1.2: Kontaktné miesta na prstenci a obmedzovači

pohybových rovníc do rotujúceho súradnicového systému využil autor transformáciu, ktorú popísal v kapitole 2.4 vo svojej práci [24]. Zavedie $\chi = \Omega_L t, u_\chi = \mathbf{e}_3$.

Ďalej je zohľadnené, že súradnice priadze na vodiacom očku, prstenci, bežci a v bode návihu sú časovo premenné. Keď sa priadza pohybuje pozdĺž stacionárnej krivky s konštantnou rýchlosťou u , platia vzťahy (ak budú súradnice počítané kladne v smere podávacej rýchlosti) na vodiči priadze: $s = s_1(t) = s_1(0) - ut$; na obmedzovacom prstenci: $s = s_2(t) = s_2(0) - ut$; na bežci: $s = s_3(t) = s_3(0) - ut$; v bode návihu: $s = s_4(t) = s_4(0) - ut$.

$$\sigma(t, s) = \frac{s - s_{R1}(t)}{s_{R2}(t) - s_{R1}(t)}, \tau(t, s) = t \quad (1.14)$$

Aby mohol autor aplikovať transformácie (1.14) bližšie popísané v kapitole 2.4 v práci [24] na časovo konštantný jednotkový interval, rozdelí priadzu na 3 jed-

notlivé oblasti: oblasť I medzi vodičom priadze a obmedzovačom $s_{R1}^I = s_1, s_{R2}^I = s_2$; oblasť II medzi obmedzovačom a bežcom $s_{R1}^{II} = s_2, s_{R2}^{II} = s_3$; oblasť III medzi bežcom a bodom náviny $s_{R1}^{III} = s_3, s_{R2}^{III} = s_4$.

Pre každú oblasť obdrží autor zo všeobecnej pohybovej rovnice so zohľadnením predchádzajúcich vzťahov a za predpokladu, že zanedbá ohybovú a torznú tuhosť a nestacionárne úrovne zrýchlenia, pohybovú rovnicu $\varrho A \left(\left(\frac{u}{l_k} \right)^2 \underline{\mathbf{r}}'' + 2 \frac{u \Omega_L}{l_k} \mathbf{S}_{\underline{\mathbf{e}}_3} \underline{\mathbf{r}}' + \Omega_L^2 \mathbf{S}_{\underline{\mathbf{e}}_3} \mathbf{S}_{\underline{\mathbf{e}}_3} \underline{\mathbf{r}} \right) = \frac{\underline{\mathbf{f}}'}{l_k} + \underline{\mathbf{q}}$, pričom platí $(\cdot)' = \frac{\partial}{\partial \sigma}$, $\underline{\mathbf{f}} = EA \left(\sqrt{\underline{\mathbf{r}}'^T \underline{\mathbf{r}}'} - 1 \right) \frac{\underline{\mathbf{r}}'}{\sqrt{\underline{\mathbf{r}}'^T \underline{\mathbf{r}}'}}$, $l_k = s_{R2}^k - s_{R1}^k$, $k = I, II$ alebo III .

Vonkajšie zaťaženie priadze je vyvolané predovšetkým odporom vzduchu. Okrem toho pôsobí na systém ešte gravitácia. Na rozdiel od odporovej sily vo vode je trenie vyvolané dotyčnicovou zložkou odporu vzduchu zanedbateľné.

Týmto je určené zaťaženie $\underline{\mathbf{q}} = -\varrho A g \underline{\mathbf{e}}_3 + \frac{1}{2} \varrho_L d_G C_n |\underline{\mathbf{v}}_{An}| \underline{\mathbf{v}}_{An}$, kde $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ je gravitačné zrýchlenie, d_G je priemer priadze, $C_n = 1, 2$ je koeficient odporu vzduchu, $\varrho_L = 1,1 \text{ kg/m}^3$ je hustota vzduchu, $\underline{\mathbf{v}}_A = -\underline{\mathbf{v}}$ je rýchlosť prúdenia vzduchu, $\underline{\mathbf{v}}_{At} = (\underline{\mathbf{v}}_A^T \underline{\mathbf{k}}_1) \underline{\mathbf{k}}_1$ je dotyčnicová zložka odporu vzduchu, $\underline{\mathbf{v}}_{An} = \underline{\mathbf{v}}_A - \underline{\mathbf{v}}_{At}$ je normálová zložka odporu vzduchu.

Rýchlosť priadze $\underline{\mathbf{v}} = \frac{u}{l_k} \underline{\mathbf{r}}' + \Omega_L \mathbf{S}_{\underline{\mathbf{e}}_3} \underline{\mathbf{r}}$ určí autor s použitím transformácií $\underline{\mathbf{a}} = \mathbf{R}_{\chi} \underline{\mathbf{a}}, \mathbf{S}_{\underline{\mathbf{a}}} = \mathbf{R}_{\chi} \mathbf{S}_{\underline{\mathbf{a}}} \mathbf{R}_{\chi}^T$ a (1.14) a s ohľadom na vyššie uvedené vzťahy.

Ďalej autor formuluje ešte okrajové podmienky. Pretože dĺžka priadze l_k nie je dopredu známa, je formulovaných dohromady $2 \cdot 3 + 1$ podmienok. K tomu pribudnú ešte podmienkové rovnice pre určenie neznámeho kontaktného uhla φ_{BE} na obmedzovači, rovnako ako normálové a trecie sily na obmedzovači (f_{nBE}, f_{rBE}) a normálové a trecie sily na bežci (f_{n1L}, f_{n3L}, f_{rL}). Dohromady bude zostavených teda 27 podmienkových rovníc.

Na jednotlivých vodiacich elementoch sú vyžadované nasledujúce okrajové podmienky:

- Vodič priadze

Vodič priadze je modelovaný ako bod. Prvý, nepohyblivý bod krivky priadze sa musí nachádzať na vodiči vo výške h nad počiatkom súradnicového systému, $\underline{\mathbf{r}}'(0) = h \underline{\mathbf{e}}_3$. Keď sa vodič priadze nachádza na osi rotácie, zodpovedá hodnota rýchlosti priadze podávacej rýchlosti podávacieho ústrojenstva $|\underline{\mathbf{v}}| = u$.

- Obmedzovač balóna

Miesto dotyku na prstencovom obmedzovači je modelované ako bod. Na popis kinematiky v mieste dotyku zaviedol autor radiálny a dotyčnicový jednotkový vektor (1.15), ktorý získal pomocou kontaktného uhla φ_{BE} .

$$\underline{\mathbf{e}}_r = \begin{pmatrix} \cos \varphi_{BE} \\ \sin \varphi_{BE} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \underline{\mathbf{e}}_t = \begin{pmatrix} -\sin \varphi_{BE} \\ \cos \varphi_{BE} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

Hodnota kontaktného uhla φ_{BE} vyplýva zo súradníc stacionárneho tvaru balóna v bode kontaktu $\varphi_{BE} = \arctan\left(\frac{\underline{\mathbf{r}}_2^{II}(0)}{\underline{\mathbf{r}}_1^{II}(0)}\right)$. Priadzový balón musí mať v mieste dotyku výšku h_{BE} a radiálnu vzdialenosť $d_{BE}/2$ od osi 3. Ďalej musia byť splnené podmienky rovnováhy v mieste dotyku. V mieste dotyku pôsobí na priadzu v zápornom $\underline{\mathbf{e}}_r$ smere normálová sila f_{nBE} . Tým bude vyvolaná smyková sila f_{rBE} . Ak je μ_{FS} koeficient smykového trenia medzi priadzou a obmedzovačom, platí $f_{rBE} = \mu_{FS}f_{nBE}$.

Smyková sila pôsobí vždy proti pohybu. Keď je rotácia vyvolaná obvodovou rýchlosťou $\Omega_L d_{BE}/2$ podstatne väčšia ako podávacia rýchlosť u , zhoduje sa smer pôsobenia smykovej sily so záporným smerom $\underline{\mathbf{e}}_t$. Takto vyjde podmienka rovnováhy $\underline{\mathbf{f}}^{II}(0) - \underline{\mathbf{f}}^I(1) - f_{nBE}\underline{\mathbf{e}}_r - f_{rBE}\underline{\mathbf{e}}_t = \mathbf{0}$.

Je požadovaná ešte jedna okrajová podmienka. Polohový vektor na konci oblasti I musí zodpovedať polohovému vektoru na začiatku oblasti II.

- Bežec

Bežec je modelovaný ako bod. Nachádza sa podľa definície vo vzdialenosti $d_s/2$ na kladnej osi 1 vo výške 0. Okrem toho musia byť splnené podmienky rovnováhy pre bežec. Na bežec s hmotnosťou m_L pôsobí gravitačná sila, ťahové sily z vedľajších úsekov priadze a prstencom vyvolané normálové a smykové sily. Normálové sily f_{n1L} a f_{n3L} pôsobia v smere kladnej osi 1 resp. 3, kedy je bežec v kontakte s prstencom v radiálnom, rovnako ako aj vertikálnom smere. Pôsobenie smykovej sily je vždy proti smeru pohybu, to znamená, že smyková sila f_{rL} pôsobí v smere zápornej osi 2. Týmto dostaneme pre bežec podmienku rovnováhy $\underline{\mathbf{f}}^{III}(0) - \underline{\mathbf{f}}^{II}(1) + f_{n1L}\underline{\mathbf{e}}_1 + f_{n3L}\underline{\mathbf{e}}_3 - f_{rL}\underline{\mathbf{e}}_2 - m_L g \underline{\mathbf{e}}_3 = \mathbf{0}$.

Ak označíme μ_{SS} ako koeficient trenia medzi prstencom a bežcom, potom platí pre smykovú silu f_{rL} vyvolanú na prstenci $f_{rL} = \mu_{SS}\sqrt{f_{n1L}^2 + f_{n3L}^2}$. Trenie

vzniká tiež medzi priadzou a prstencom. Podľa známej Eulerovej teórie pre trenie platí $\bar{f}_1^{III}(0) = \bar{f}_1^{II}(1)e^{C_\mu \mu_{FS} \alpha_\mu}$ pre ťahové sily na susedných úsekoch priadze, pričom autor zavádza koeficient C_μ , čím dokáže ovplyvniť hodnotu výslednej trecej sily. Uhol opásania α_μ vypočítame pomocou dotyčnicových vektorov susedných úsekov priadze.

Na dopriadanie priadzí rôznych jemností a typov sa používajú rôzne bežce. Bežce sa rozlišujú podľa ich hmotností, tvaru a tvaru ich prierezu. Autor nepredpokladaná žiadny konkrétny typ bežca, ale bežec modeluje ako hmotný bod o hmotnosti m_L .

Vďaka koeficientu C_μ je možné predpokladať, že vzťahy pre opásanie na bežci nemajú klasický tvar. Nakoniec je požadovaná ešte jedna prechodová podmienka. Polohový vektor na konci oblasti *II* musí zodpovedať polohovému vektoru na začiatku oblasti *III*.

- Bod náviny na potáči

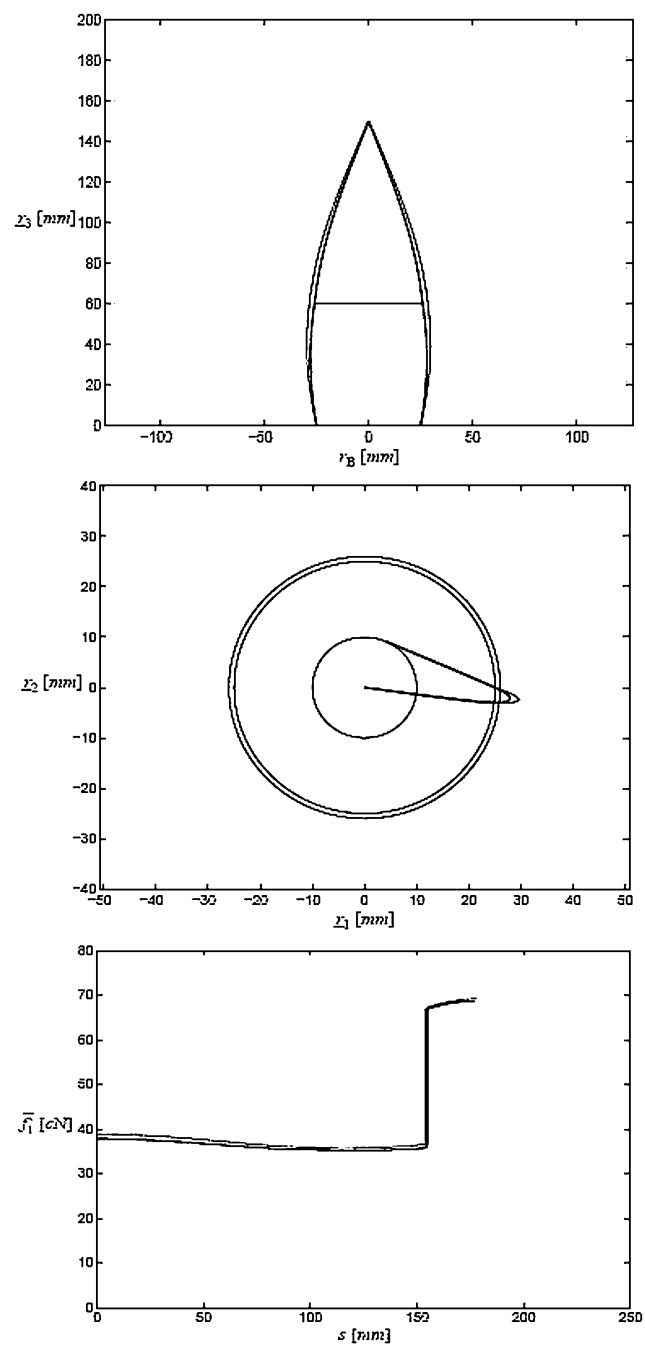
Bod náviny na potáči sa nachádza pri pohybe prstencovej lavice nadol o niečo vyššie a pri pohybe prstencovej lavice nahor o niečo nižšie ako rovina, v ktorej leží prstenec a bežec. Tento rozdiel je malý a bude zanedbaný. Bod náviny na potáč sa musí teda nachádzať v radiálnej vzdialenosti $d_W/2$ vo výške 0, to znamená, že musí platiť $|\mathbf{r}^{III}(1)| = d_W/2$ a $\mathbf{e}_3^T \mathbf{r}^{III}(1) = 0$.

V bode náviny nabieha priadza na potáč a pohybuje sa po kruhovej dráhe. Nesmú preto existovať žiadne radiálne zložky rýchlostí. Priadza nabieha na potáč tangenciálne. Hodnota rýchlosti v bode náviny zodpovedá obvodovej rýchlosti potáča na polomere navíjania $|\mathbf{v}| = \Omega_S d_W/2$.

Týmto je výpočtový model kompletný. Popísané diferenciálne rovnice discretizuje autor použitím metódy konečných prvkov popísanej v kapitole 3.1 v práci [24]. Oblasť *I* rozdelil autor na 9 konečných elementov, oblasť *II* na 7 a oblasť *III* na 6 elementov.

Po priestorovej diskretizácii a po zahrnutí vyššie popísaných okrajových a prechodových podmienok dostane Weiss systém nelineárnych algebraických rovníc, ktoré rieši Newton–Raphsonovou metódou.

Autor skúmal niektoré výpočtové prípady, aby odvodil výroky o vplyve významných parametrov na tvar balóna a na zaťaženie priadze vyskytujúce sa pri dopria-



Obr. 1.3: Výsledok simulácie

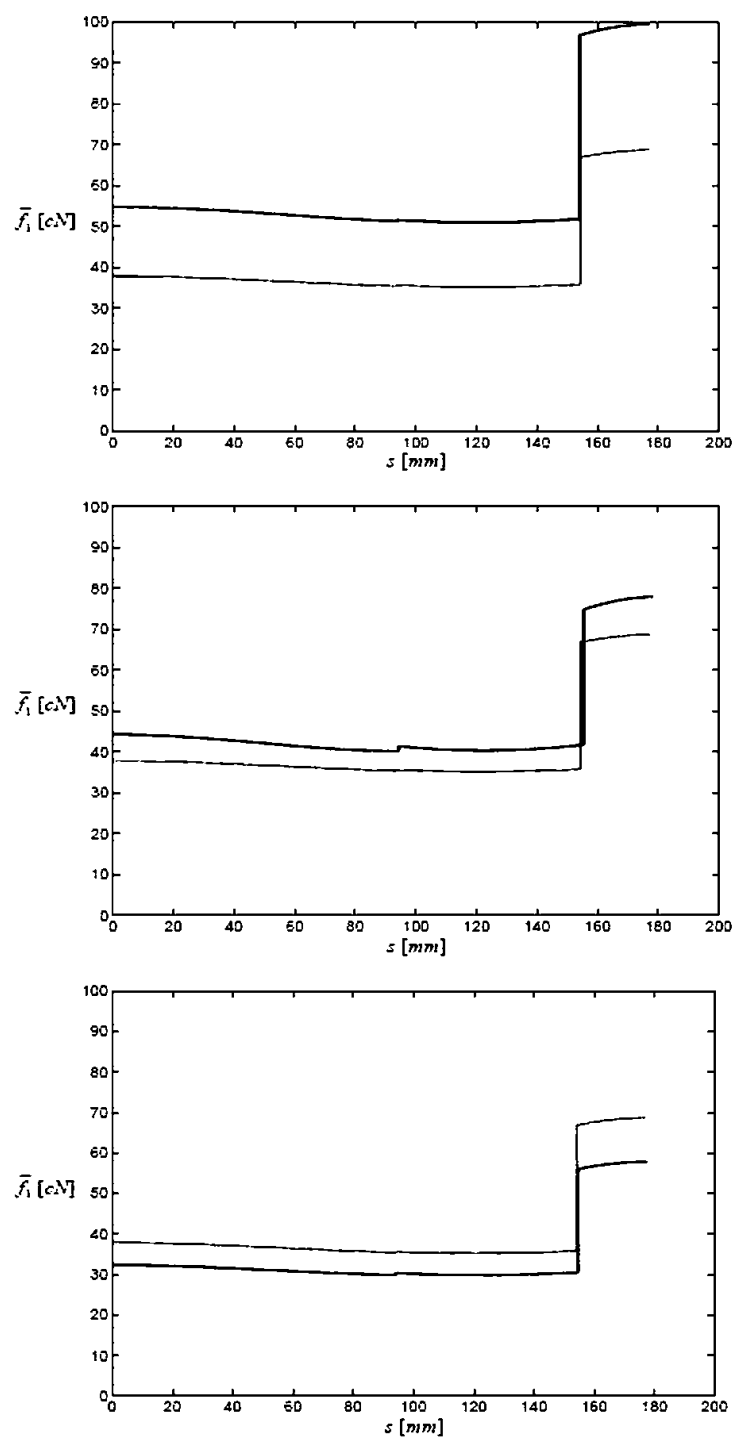
daní. Uskutočnil výpočty jednak s ako aj bez obmedzovača. Použité hodnoty parametrov sa nevzťahujú sa na žiadny konkrétny stroj, ale ležia v bežných medziach dnešných zariadení.

Na obrázku 1.3 sú zobrazené výsledky výpočtov. Obrázky zobrazujú nárys a pôdorys krivky balónujúcej priadze a priebeh ťahovej sily v priadzi medzi vodiacim očkom a miestom navinu na potáči. Priebeh ťahovej sily v priadzi pre pradenie s obmedzovacím prstencom má dve a priebeh ťahovej sily pre pradenie bez obmedzovacieho prstenca má jedno miesto nespojitosti. Tieto zmeny vznikajú v miestach dotyku priadze s obmedzovacím prstencom resp. bežcom. Pritom je zmena v priebehu ťahovej sily, ktorá vzniká na bežci vzhľadom k pomeru opásania, významne väčšia ako na obmedzovacom prstenci. Najväčšia ťahová sila sa vyskytuje na potáči.

Jedine pri silne vypuklom balóne klesá zreteľne ťahová sila v maximálnom polomere balónu. Ťahová sila v prieťahovom ústrojenstve je vzhľadom k tretej sile vznikajúcej vo vodiacom očku ešte menšia ako vo vodiči priadze. Na potáči nesmie byť ťahová sila pod istou hodnotou, ktorou je na potáči zaistená tuhosť návinu. Naopak je žiadúce, aby ťahová sila vo vodiči (a tým tiež v prieťahovom ústrojenstve) klesla čo možno najviac. Priamo za prieťahovým ústrojenstvom v spriadacom trojuholníku, kde dochádza k vlastnému spriadaniu predpriadze do priadze, je pevnosť priadze malá a s tým je nebezpečenstvo prietru vysoké.

Z obrázkov uvedených v práci [24] je jasný vplyv obmedzovača na proces prstenčového dopriadania. Zúžuje priadzový balón. Dĺžka balónujúcej priadze nachádzajúcej sa medzi vodičom a potáčom je pri dopriadaní s obmedzovačom kratšia ako pri dopriadaní bez obmedzovača. Navyše sú ťahové sily vyskytujúce sa pri dopriadaní s obmedzovacím prstencom menšie ako pri dopriadaní bez obmedzovača, hoci vzniká ďalšie miesto trenia. Príčina súvisí s menším polomerom balónu a tým sú menšie odstredivé sily.

Ďalšie významné ovplyvňujúce veličiny sú okrem geometrických rozmerov otáčky vretien n_s , jemnosť dopriadanej priadze ϱA a hmotnosť bežca m_L . Aby bol odhadnutý vplyv týchto troch parametrov, boli urobené výpočty s troma rôznymi hodnotami týchto parametrov. Všetky ostatné parametre sú zvolené ako vo výpočtovom prípade 1 [24]. Obr. 1.4. ukazuje priebehy ťahových síl pre tieto výpočtové prípady. Pre porovnanie bol vynesovaný v každom diagrame priebeh ťahovej sily z prípadu 1. Tvary balónu zodpovedajú približne prípadu 1. Ako je možné vidieť, s rastúcimi otáčkami vretena rastú ťahové sily v priadzi. Prírastok v ťahových silách je pri tom



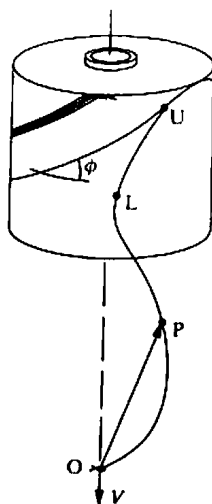
Obr. 1.4: Výsledky simulácií pre rôzne hodnoty parametrov n_s , ϱA a m_L

približne kvadrát rastu otáčok. Ďalej je vidno, že sú ťahové sily väčšie keď je dopriadaná hrubšia priadza.

Redukciou hmotnosti bežca klesá ťahová sila. Ak bude ale zvolená hmotnosť bežca príliš malá, môžu sa vyskytovať nestabilné kmitania, ktoré vedú k zborteniu balóna.

1.1.3 Odvíjanie priadze z valcovej cievky – nepredĺžiteľná priadza

Posledným modelom, ktorému sa budeme venovať, je model odvíjania zostavený Fraserom a kol., popísaný v [9]. Cieľom jeho výskumu bolo analyzovať dynamiku priadze medzi bodom, kde sa priadza začína pohybovať zo stacionárnej pozície na povrchu cievky (bod U – bod odvinu na obr. 1.5) a vodiacim očkom.



Obr. 1.5: Konfigurácia pri odvíjaní cez hlavu: vodiace očko O , balón OPL , bod odtrhu L , bod odvinu U , uhol navíjania ψ_u , odťahová rýchlosť V

Pohyb prebieha v dvoch oblastiach: priadza sa najprv klže po povrchu cievky, kým dotyčnicový uhol medzi priadzou a povrchom cievky nie je práve taký, aby priadza opustila povrch cievky a dostala sa do balóna. Bod, kde sa to deje, je nazvaný bod odtrhu (L na obr. 1.5). V tomto článku je navrhnutá sada podmienok spojitosti v bode odtrhu, ktorá môže byť použitá na prepojenie týchto dvoch riešení a na

poskytnutie kompletného riešenia od vodiaceho očka k bodu odvíjania. Aby bola zaistená štrukturálna stabilita cievky, je priadza navinutá v skrutkovicovom tvare s uhlom navíjania od 5° do 15° medzi priadzou a rovinou kolmou na os. Kvôli tomu sa bod odvinu a bod odtrhu pohybujú sem a tam pozdĺž cievky počas odvíjania a pohyb je periodický.

Ak je uhol navíjania nulový alebo blízky nule, je jasné, že okrajové podmienky na cievke, rovnako ako aj vo vodiacom očku sa budú meniť veľmi pomaly v porovnaní s periódou rotačného pohybu balóna a tak v tomto prípade bude tvar balóna stacionárny z pohľadu rotujúceho súradnicového systému. Už skôr bolo v literatúre ukázané, že pre dostatočne malý uhol návinnu bude význam časových derivácií v pohybových rovniciach malý v porovnaní s inými členmi a že dynamika periodického balóna môže byť aproximovaná riešením problému stacionárneho balóna na modifikovaných okrajových podmienkach v bode odvinu. Výsledok je, že riešenie časovo premenného balóna môže byť odvodené zo sekvencie riešení stacionárneho balóna, ktorá je periodickou funkciou času. Takže je možné sledovať vývoj dynamiky tvaru priadze od bodu odvinu k vodiacemu očku počas kompletnej periódy cyklu odvíjania.

Matematická formulácia problému je daná v práci [9] vrátane derivácií okrajových podmienok v bode odvinu. Ďalej sú tu uvedené rovnice transformované do bezrozmerného tvaru a je vysvetlená metóda postupných aproximácií. Následne sú detailne diskutované numerické riešenia rovníc stacionárneho balóna, rovnako ako aj ich aplikovanie na problém odvíjania a v druhej časti je dané analytické riešenie rovníc pre pohyb priadze klzajúcej sa po povrchu cievky.

Autor predpokladá hmotný bod priadze P , ktorý má v čase t polohu s meranú pozdĺž priadze od vodiaceho očka. Nech je $\mathbf{R}(s, t) = r\mathbf{e}_r + z\mathbf{k}$, polohový vektor bodu P nech je vzťahnutý k počiatku súradnicového systému O vo vodiacom očku (obr. 1.5). Nech sú r, ϑ, z valcové súradnice zodpovedajúce jednotkovým vektorom $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\vartheta, \mathbf{k}$ súradnicového systému, ktorý rotuje konštantnou uhlovou rýchlosťou $\omega\mathbf{k}$ okolo osi z , ktorá splýva s osou cievky. Diskusia je obmedzená na valcové cievky, takže nedochádza k strate na všeobecnosti vyplývajúcej z predpokladu, že ω je konštantné, pod podmienkou, že ω je zvolené tak, aby bolo zodpovedajúce priemernej uhlovej rýchlosti. Poznamenajme, že bod odvinu a bod odtrhu nerotujú konštantnou uhlovou rýchlosťou okolo cievky. Uhlová rýchlosť týchto bodov na povrchu cievky sa bude meniť periodicky podľa ich pohybu tam a späť pozdĺž cievky a tento efekt je

vypočítaný pre časovú závislosť súradníc týchto bodov $\vartheta_u(t)$, $z_u(t)$, resp. $\vartheta_1(t)$, $z_1(t)$.

Ak je $T(s, t)$ ľah priadze v bode P a priadza je uvažovaná ako dokonale ohybná a rovnomerná, potom je vektorový tvar pohybových rovníc elementu priadze P (1.16),

$$m [D^2\mathbf{R} + 2\omega\mathbf{k} \times D\mathbf{R} + \omega^2\mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{R})] = \frac{\partial}{\partial s} \left(T \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial s} \right) + \mathbf{F} \quad (1.16)$$

kde D je diferenciálny operátor daný $D = \frac{\partial}{\partial t} - V \frac{\partial}{\partial s}$, V je konštantná rýchlosť krivky priadze a m je dĺžková hustota priadze.

Operátor D je totálna časová derivácia sledujúca pohyb bodu P vzhľadom k rotujúcej súradnicovej sústave. Takže $D\mathbf{R}$ je rýchlosť hmotného bodu P a $D^2\mathbf{R}$ je jeho zrýchlenie vzhľadom k rotujúcemu rámu. Druhý člen v zátvorke na ľavej strane rovnice (1.16) je Coriolisovo zrýchlenie bodu P . Vektor \mathbf{F} je sila odporu prostredia vzťahnutá na jednotku dĺžky pôsobiaca na priadzu. Je dôsledkom odporu vzduchu, ak sa P nachádza v balóne alebo trecieho odporu, ak sa P nachádza na povrchu cievky. Nech je $s = s_1(t)$ dĺžka priadze v balóne (medzi vodiacim očkom a bodom odtrhu) v nejakom čase t a $s = s_u(t)$ nech je celková dĺžka priadze medzi vodiacim očkom a bodom odvinu. Sú uvažované dva prípady pohybových rovníc (1.16):

1. keď sa hmotný bod P nachádza v balóne ($0 \leq s \leq s_1(t)$), je vektor \mathbf{F} rovný sile spôsobenej odporom vzduchu,
2. keď sa hmotný bod P kľže po povrchu cievky ($s_1(t) \leq s \leq s_u(t)$), je vektor \mathbf{F} rovný smykovému odporu pôsobiacemu proti pohybu

vektor \mathbf{F} úmerný odporu vzduchu na balón: Každý hmotný element priadze môže byť uvažovaný ako valec s jeho osou v kosom uhle k smeru toku vzduchu. Takže je nutné uvažovať zložky odporu vzduchu v smeroch normálových a dotyčnicových k priadzi. V tomto modeli uvažuje autor len normálovú zložku odporu vzduchu.

vektor \mathbf{F} úmerný smykovému odporu na povrchu cievky: Sila \mathbf{F} pôsobiaca na priadzu, ktorá kľže po povrchu cievky je spôsobená trením a reakciou medzi pohybujúcou sa priadzou a cievkou. Hodnota trecej zložky sily \mathbf{F} je normálovou reakciou predpokladaná taká, aby bola úmerná normálovej sile medzi priadzou a cievkou (Amontonov zákon) a pôsobí v smere $-\mathbf{v}$ oproti pohybu bodu P . Takže platí (1.17),

$$\mathbf{F} = -\mu N \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|} + N \mathbf{e}_r \quad (1.17)$$

kde μ je koeficient trenia na cievke, N je veľkosť normálovej sily (na jednotku dĺžky) medzi priadzou a cievkou a \mathbf{v} je rýchlosť bodu P daná rovnicou $\mathbf{v} = D\mathbf{R} + \omega \mathbf{k} \times \mathbf{R}$.

Diferenciálna rovnica (1.16) je vektorová rovnica obsahujúca neznámy polohový vektor $\mathbf{R}(s, t)$ a ťah $T(s, t)$. Aby s počtom neznámych súhlasil počet rovníc, je požadovaná ešte jedna rovnica. Sú tu dve možnosti. Priadza môže byť predpokladaná ako nepredlžiteľná, a to problém značne zjednodušuje. V tom prípade je požadovanou rovnicou podmienka nepredlžiteľnosti (1.18), čo predpokladá autor vo svojom modeli.

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial s} \cdot \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial s} = \left(\frac{\partial r}{\partial s} \right)^2 + r^2 \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial s} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial s} \right)^2 = 1 \quad (1.18)$$

Každopádne, viac realistický model by mal započítavať elastické alebo viskoelastické vlastnosti priadze.

Na koniec, pre úplnosť matematického popisu problému, musia byť formulované počiatkové a okrajové podmienky. Kým je pohyb periodický, je vhodnejšie než počiatkové podmienky do riešenia zaviesť podmienku periodicity.

Okrajové podmienky musia byť formulované vo vodiacom očku $s = 0$ a v bode odvinu $s = s_u$. V bode odtrhu $s = s_1$ musia byť položené podmienky spojitosti medzi riešením v balóne a riešením na cievke.

Bohužiaľ okrajové podmienky nevedú k jednoznačnému riešeniu. Ako je uvedené v [9], diskrétné hodnoty T_0 (ťah priadze vo vodiacom očku) vedú k tvarom balóna s rôznym počtom slučiek alebo vĺn. Z tabuliek uvedených v citovanej práci vyplýva, že s rastúcim počtom vĺn klesá ťahová sila.

Z pohybových rovníc po úpravách vyplýva, že ťah v bode odvinu nezávisí na μ , koeficient trenia po cievke určuje vzdialenosť medzi bodom odtrhu a bodom odvinu. S väčšou hodnotou μ je táto vzdialenosť menšia.

V okamihu, keď bod odtrhu dosiahne čelo cievky, nie je splnená okrajová podmienka $r'(s_1, t) = 0$ na vrchu balóna a je nutné uvažovať, že v tomto okamihu bude tvar balóna podliehať rýchlej zmene a členy s časovou deriváciou v pohybových rovniciach nemôžu byť viac zanedbávané. Ako prvý krok v riešení tejto časti problému musí byť vyšetrená otázka stability tvaru stacionárneho balóna podrobeného malým zmenám okrajových podmienok a na čele cievky.

V súlade s analýzou v [9] je ťah $T(s, t)$ v krivke priadze kompletne určený dynamikou balóna a je tiež závislý na koeficiente trenia μ . Takže ťah $T_u(t)$ v bode odvinu sa mení periodicky s ťahom $T_0(t)$ vo vodiacom očku. Periodická zmena v $T_0(t)$ bola

pozorovaná experimentálne. Očakáva sa, že zbytkový ťah T_{res} v priadzi ležiacej vo zvyšku cievky by sa mal meniť len veľmi pomaly s odvíjaním priadze z cievky z jej maximálneho na minimálny polomer. Neočakáva sa, že by sa T_{res} menilo periodicky a je jasné, že nie je porovnateľné s $T_u(t)$. Je preto nutné stanoviť mechanizmus, ktorý vysvetľuje rozdiely v ťahu, $T_u(t) - T_{\text{res}}$ (T_{res} je konštantné), medzi bodom odvinu s_u a nejakým bodom na krivke ($s = s_{\text{res}} \geq s_u$) mimo cievky.

Pohyb krivky priadze medzi cievkou a vodiacim očkom pri odvíjaní cez hlavu sa odohráva v troch stupňoch. Za prvé, ťah v stacionárnej priadzi ležiacej na cievke rastie z reziduálneho ťahu v priadzi spôsobeného stavbou cievky smerom k bodu odvinu, kde sa priadza začne pohybovať preč z jej stacionárnej pozície. Priadza sa teraz kľže po povrchu cievky, kým ťah a dotyčnicový uhol nie sú práve také, aby opustila povrch cievky a dostala sa do balóna.

Priadza prechádza pri odvíjaní týmito oblasťami:

1. nepohybujúca sa priadza ležiaca na cievke (kde sa ťah znižuje na zbytkový) až po bod odvinu,
2. priadza kľžajúca po povrchu cievky medzi bodom odvinu a bodom odtrhu,
3. balónujúci pohyb priadze medzi vodiacim očkom a bodom odtrhu.

Autor zostavil veľmi jednoduchý model pre interakciu medzi nepohybujúcou sa priadzou a cievkou, ktorý dosiahne redukciu ťahu požadovanú v prvom odvíjacom štádiu:

Fraser predpokladá, že pre $s_u \leq s \leq s_{\text{res}}$ je priadza vystavená statickej trecej sile a normálovej sile na jednotku dĺžky danou (1.19).

$$\mathbf{F}_s = \mu_s N \mathbf{e}_\vartheta + N \mathbf{e}_r \quad (1.19)$$

Rovnica rovnováhy pre túto časť krivky priadze je (1.20), kde $\mathbf{R}(s) = \mathbf{e}_r + z(s)\mathbf{k}$ a pre nulovú hodnotu uhla návinu je nulový, takže $z'(0) = 0$ a $\vartheta'(s) = 1$, čo vedie k (1.21).

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{d\mathbf{R}}{ds} \right) = \mathbf{F}_s \quad (1.20)$$

$$\frac{d\mathbf{R}}{ds} = \mathbf{e}_\vartheta \quad (1.21)$$

Ak sú rovnice (1.19) a (1.21) dosadené do (1.20) a normálová sila N je eliminovaná na dve zložky, získame rovnicu $\frac{\partial T}{\partial s} + \mu_s T = 0$ pre zmeny v ťahu pozdĺž krivky priadze.

Integrovanie tejto rovnice a použitie ťahových okrajových podmienok v $s = s_u$ a $s = s_{res}$ vedie k vyjadreniu dĺžky stacionárnej krivky (1.22), nad ktorou sa ťah zmenší na T_{res} .

$$\Delta s = s_{res} - s_u = (1/\mu_s) \ln(T_u/T_{res}) \quad (1.22)$$

Teraz je možné vysloviť otázku, ktoré z riešení modelovania balóna použiť vo výpočte odvíjania. Ak je požadované, aby bol tvar krivky vždy daný minimalizáciou ťahu vo vodiacom očku, potom vedie požadovaná energia v členoch vyššie popísaného modelu k záveru: vyber také riešenie balóna ktoré vedie k najmenšej hodnote T_0 (a odtiaľ T_u), pre ktoré je Δs definované rovnicou (1.22) stále kladné.

Autor ukázal, ako môže byť časovo závislý problém riešený zo sekvencie kvázistacionárnych riešení. Je daná nová derivácia pohybových okrajových podmienok v bode odvinu na cievke a dôsledok metódy postupných aproximácií je, že časová závislosť prvej aproximácie na riešení je úplne kontrolovaná touto pohybovou okrajovou podmienkou. Takže bolo možné zlúčiť úplný pohyb krivky priadze medzi bodom odvinu a vodiacim očkom cez celý cyklus pohybu bodu odvinu tam a späť po cievke. Bol tiež navrhnutý jednoduchý model pre zostavenie priebehu ťahovej sily v nepohybujúcej sa priadzi z navíjacieho ťahu po ťah v bode odvinu.

Podstatný problém, ktorý stále zostáva, je analýza, čo sa deje, keď bod odtrhu opustí okraj cievky pri pohybe bodu odvinu smerom k vodiacemu očku.

1.2 Konštrukčné usporiadanie systému smyčkového dopriadania

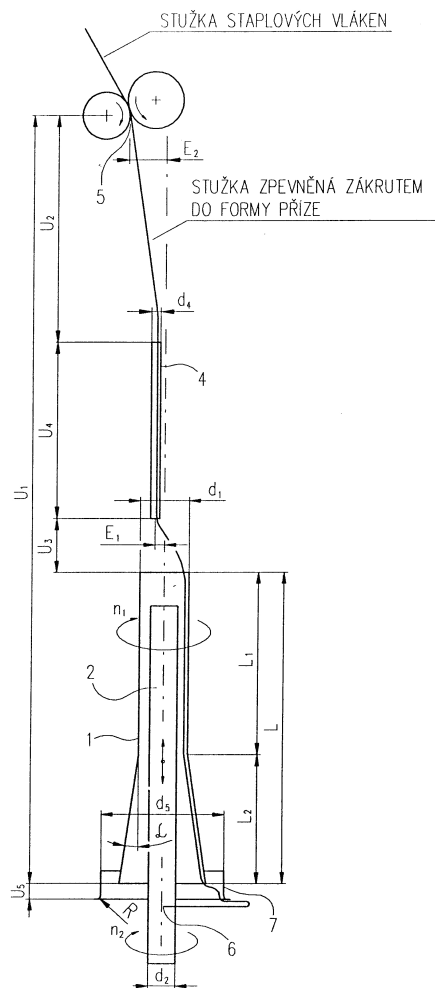
Smyčkové dopriadanie patrí, rovnako ako prstencové, medzi vretenové dopriadacie systémy. Ako už bolo spomenuté, prstencové pradenie je na hraniciach svojich technologických možností, preto sa pozornosť sústreďí na spôsoby tvorby priadze. Jedným z týchto nových systémov je smyčkové dopriadanie.

Charakteristické pre smyčkové dopriadanie sú:

- obmedzovač,
- smyčka priadze,
- vreteno s dutinkou.

Na obr. 1.6 je vyobrazená zjednodušená schéma smyčkového dopriadacieho systému, kde sú vyznačené základné komponenty:

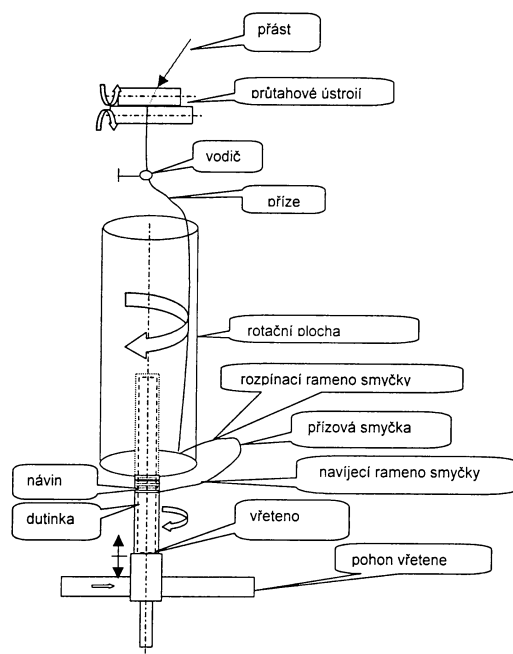
- obmedzovač 1
- rotujúci trň vretena 2
- podperný prstenec 7
- trubička obmedzovača 4
- stisková línia výstupných valčekov priťahového ústrojenstva 5
- miesto navíjania 6



Obr. 1.6: Náhradná schéma smčkového dopriadania

Táto práca sa zaoberá prednostne obmedzovacím telesom a smyčkou, a to z toho dôvodu, že vreteno s dutinkou býva riešené v súvislosti s prstencovým dopriadaním.

Podľa užitného vzoru CZ 15024 U1 je balónový obmedzovač podľa obr. 1.7 známy z rôznych patentových dokumentov (EP 0 933 454 A2, EP 0 959 158 A1). Je tvorený zvonkovým obmedzovacím telesom s vnútorným pracovným povrchom pre styk s priadzou. Obmedzovacie teleso musí byť vyrobené veľmi presne a kvalitne tak, aby zaistilo príslušné technologické a prevádzkové podmienky i pri rýchlosti nad 40000 ot/min. Zároveň musí vykazovať relatívne vysokú životnosť a nízke výrobné náklady. Nutná je tiež jeho nízka hmotnosť, ktorá je výhodná pri spúšťaní a zastavovaní stroja, dostatočná tuhosť proti pôsobeniu odstredivých síl, ako i čo najnižšia drsnosť jeho vnútorného pracovného povrchu, ktorá zaisťuje plynulý klzavý pohyb priadze v osovom smere, ale zároveň unášanie priadze okolo osi vretena. Nízka hmotnosť obmedzovacieho telesa rovnako znižuje príkon hnacej energie. Dôležitou podmienkou pre dosiahnutie prevádzkovej spoľahlivosti obmedzovacieho telesa je tiež jeho vysoká tvarová pevnosť.



Obr. 1.8: Schéma smyčkového systému [8]

Zakrucovanie priadze je zaistené pomocou tohoto rotujúceho dutého telesa (obmedzovača, unášača), ktorého dutinou prechádza vytváraná priadza a pritom leží na jeho vnútornej stene (viď obr. 1.6, 1.7 a obr. 1.8). Rotujúca vnútorná stena unáša priadzu a zároveň pôsobí ako obmedzovač balóna, ktorý rotujúcu priadzu vytvára.

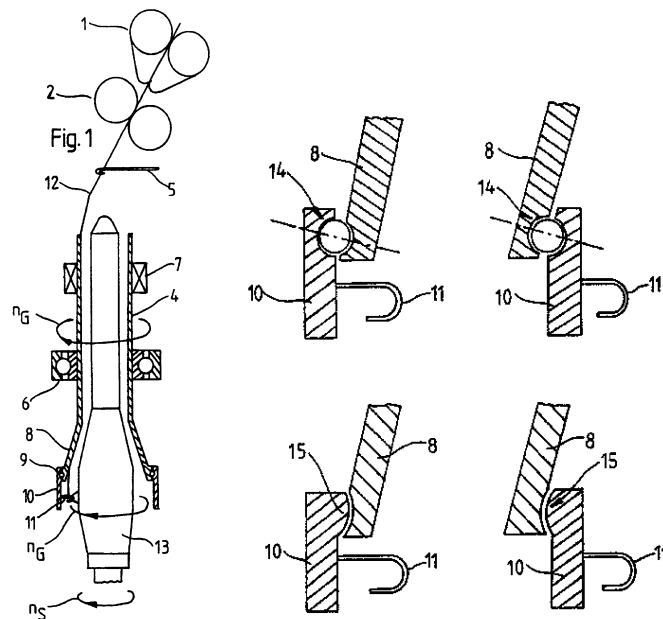
Smyčka sa vytvára v časti medzi spodnou hranou obmedzovača a miestom návlnu na cievku (obr. 1.8).

1.2.1 Varianty usporiadania systému, patenty

Ako už bolo napísané vyššie, systém smyčkového dopriadania je spolu so všetkými svojimi alternatívami typický tromi znakmi. Ide o vreteno s dutinkou, obmedzovač a smyčku.

Systém, ktorý skúmame, je v podstate základom pre ďalšie rôzne varianty. Je patentovaný Výskumným ústavom bavlnárskym pod číslom WO 2004/076727 s balónovým obmedzovačom chráneným užitným vzorom číslo CZ 15024 (U1) (viď obr. 1.7).

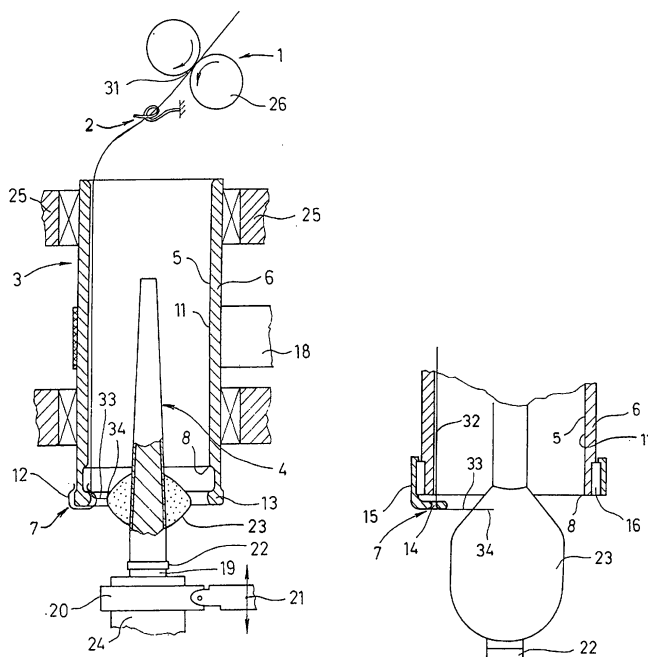
Jednotlivé možnosti usporiadania sa líšia tvarom obmedzovacieho telesa alebo tvarom a uložením prstenca. Ten môže byť buď pevný, alebo sa otáčať. Prvá varianta usporiadania je uvedená v európskom patente č. EP 0 458 154 A1. Prstenec (10) je pohyblivý, je na ňom v tomto prípade upevnené otvorené očko (11) na obr. 1.9.



Obr. 1.9: Usporiadanie podľa patentu EP 0 458 154 A1, vpravo možnosti uloženia prstenca

Ďalšie možnosti môžeme nájsť v patente č. EP 0 496 114 A2 a CZ 278 771 B6.

Na dolnej hrane obmedzovača je uložený bežec (12) a ako druhá možnosť je uvedená očko (14) v prstenci (15), ktorým je vedená priadza (obr. 1.10). Nevýhodu prvej možnosti odstraňuje druhá. Ide totiž o obmedzenie, ktoré je známe z klasického prstencového dopriadania- obmedzenie bežcom. Zvýšenie výkonu systémov s bežcom je totiž limitované minimálnou možnou hmotnosťou bežca, jeho maximálnou rýchlosťou a prípustným opotrebovaním [17].

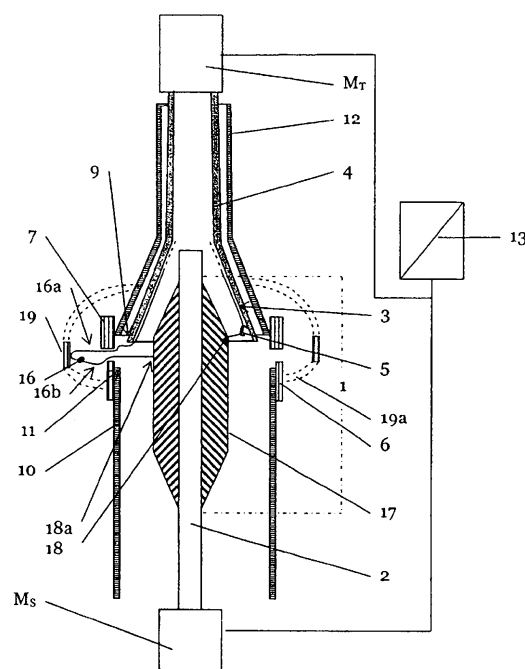


Obr. 1.10: Tvar prstenca s bežcom a s očkom, patenty č. EP 0 496 114 A2 a CZ 278 771 B6

Trocha iný prístup mala v patente pod číslom DE 10 2005 040 963 A1 firma Maschinenfabrik Rieter AG, Winterthur. Popisuje také usporiadanie, že veľkosť smyčky a teda i ťahovej sily je daná polohou prstencov (7, 6, 19) (viď obr. 1.11).

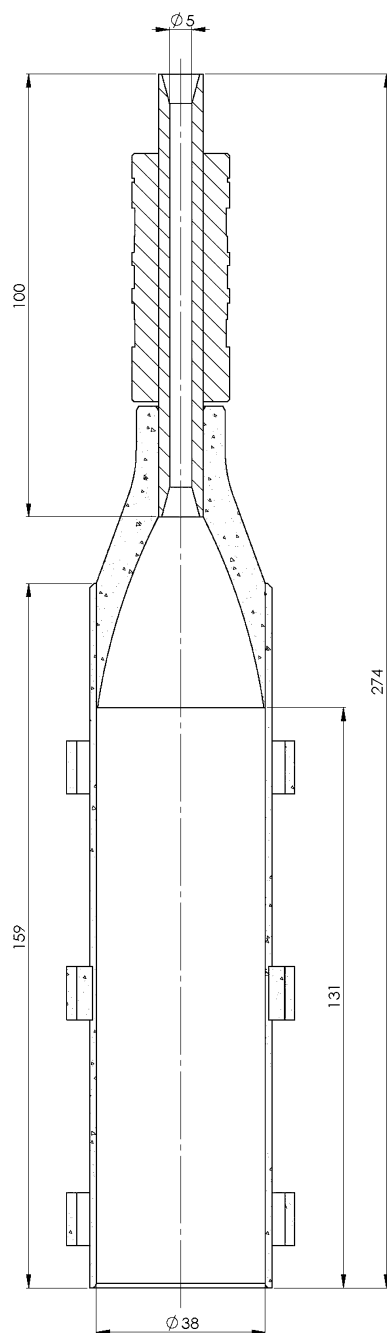
Systém, ktorý sme testovali mal pôvodne tvar ako je na obr. 1.7, čiže obmedzovač sa skladal z 1 valcovej, 1 anuloidovej a 3 kužeľových plôch. V súčasnej dobe sa od tejto náročnej konštrukcie upustilo a došlo k zjednodušeniu tvaru obmedzovacieho telesa. Experimentálne bolo zistené, že za trubičkou a anuloidom je postačujúci valec bez prstenca. Tento nový tvar je zobrazený na obr. 1.12 a bude predmetom analýz pomocou numerických simulácií.

Štandardne je potáč s návinom pri dopriadaní stavaný tak, že navinutá časť je vy-



Obr. 1.11: Obmedzenie veľkosti smyčky pomocou viacerých prstencov podľa patentu č. DE 10 2005 040 963 A1

súvaná z obmedzovača. Najnovšie je testované také usporiadanie, že potáč, na ktorý je navíjaná vytváraná priadza, je postupne zasúvaný do obmedzovača, to znamená, že vretenová lavica neputuje v priebehu dopriadania nadol, ale naopak. Tento prístup je chránený užitným vzorom CZ 20673 (U1) a patentom WO 2011/076156 A1. Výhodou tohoto usporiadania je úspora energie vďaka zníženiu ventilačných odporov na potáči.



Obr. 1.12: Modifikovaný tvar obmedzovača

Kapitola 2

Teoretická časť

2.1 Matematické modely smyčkového dopriadania

K modelovaniu balónujúcej priadze je možné pristúpiť dvoma spôsobmi. Tento jav môžeme považovať za kvázistacionárny, a pri modelovaní zostaviť stacionárny model, alebo ho modelovať ako dynamický jav [7].

Každopádne však v systéme smyčkového dopriadania pôsobia rôzne sily a na obr. 2.1 je vyobrazená zjednodušená schéma popisujúca princíp fungovania smyčkového dopriadania.

Ďalej sa venujme jednotlivým modelom, predpokladom ich platnosti a výsledkom.

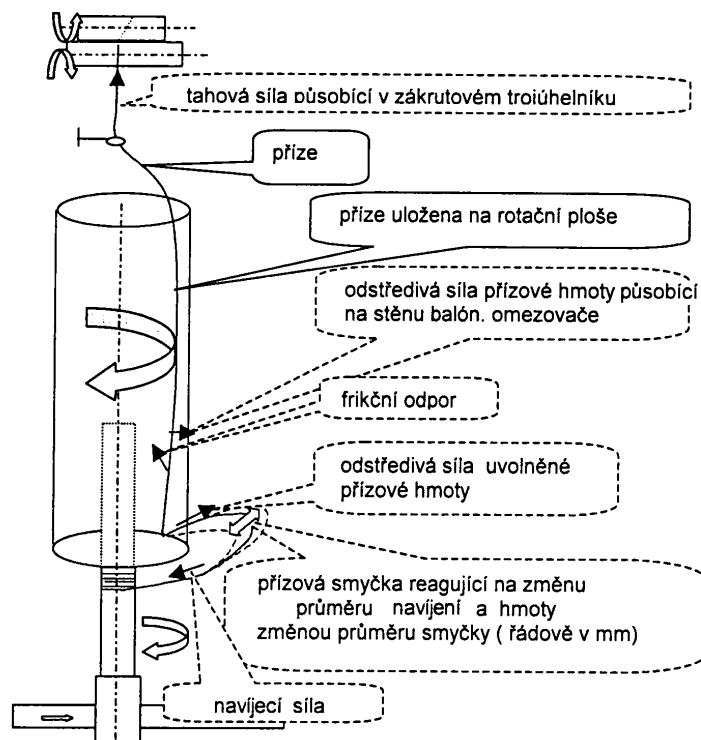
2.1.1 Stacionárny model

Exaktné riešenie tvaru krivky priadze vo všeobecnom priestorovom prípade je veľmi obtiažne. Prakticky nie je možné dôjsť k jednoduchému analytickému vyjadreniu tvaru tejto krivky. Za určitých zjednodušujúcich predpokladov možno ku stanoveniu krivky pohybujúcej sa priadze dospieť numerickým riešením danej okrajovej úlohy.

Predpoklady definujúce matematický model

Predpoklady definujúce zjednodušený model balónujúcej priadze:

- priadza je ideálne ohybná,
- priadza je hmotne rovnomerná,



Obr. 2.1: Sily pôsobiace na priadzu [8]

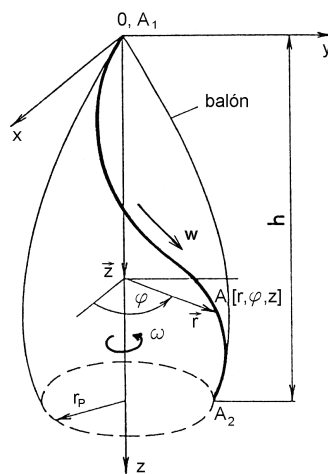
- deformácia priadze nie je ovplyvnená relaxačnými ani kríčovými javmi a nezávisí na teplote a vlhkosti,
- unášivá uhlová rýchlosť priadze je konštantná,
- relatívna rýchlosť podávania priadze je konštantná,
- okrajové podmienky sú nezávislé na čase,
- vysokofrekvenčné deje, ktoré spôsobujú kmitanie priadze okolo kvázistacionárnej polohy, nie sú v modele uvažované,
- vplyv odporu vzduchu v smere dotýčnice ku krivke balónujúcej priadze je zanedbaný.

Všeobecné pohybové rovnice balónujúcej priadze

Tvar balóna sa počas technologického procesu mení, pretože sa menia okrajové podmienky dané príslušnou technológiou. Jedná sa hlavne o zmenu výšky balóna

a zmenu polomeru navíjania na cievke. Charakter týchto zmien, obzvlášť v prípade valcového vinutia, však umožňuje posudzovať pohyb priadze v balóne ako kvázistacionárny a tým považovať okrajové podmienky na čase nezávislé. Vysokofrekvenčné deje, ktoré spôsobujú kmitanie priadze v balóne okolo kvázistacionárnej polohy, nebudú rešpektované. Jedná sa napríklad o kmitanie vretien, nerovnomerný pohyb obmedzovača, nesúososť celej sústavy vodiace očko–obmedzovač–vreteno. Cieľom tohoto modelu je stanovenie kvázistacionárneho tvaru balóna.

Pohybové rovnice voľne balónujúcej priadze



Obr. 2.2: Priadzový balón

Pre prípad balónujúcej priadze podľa obr. 2.2 zavedme systém cylindrických súradníc $Or\varphi z$, ktorý sa otáča uhlovou rýchlosťou ω okolo súradnicovej osi z . Počiatok súradnicového systému O je uprostred vodiaceho očka (v náhradnej schéme na obr. 1.6 nezakreslené) a os z je totožná s osou vretena 2. Uhlovú rýchlosť rotujúcej smyčky označme ω a relatívnu rýchlosť priadze w . Rovnica rovnováhy elementa priadze dĺžky ds má tvar (2.1),

$$\mathbf{F}_v + \frac{d(T\mathbf{t})}{ds} = \mathbf{0} \quad (2.1)$$

kde \mathbf{F}_v je výsledná vonkajšia sila pôsobiaca na element ds vztiahnutá na jednotku dĺžky priadze, \mathbf{t} je jednotkový vektor dotýčnice ku krivke balónujúcej priadze, T je ťah priadze. Rovnicu (2.1) je podľa [16] možné rozpísať do zložkových rovníc (2.2), kde μ_0 je jemnosť priadze, l je dĺžka nezaťaženej priadze, F_{or} , $F_{o\varphi}$, F_{oz} sú zložky

odporu vzduchu pri obtekaní priadze vztiahnuté na jednotku dĺžky priadze a g je tiažové zrýchlenie.

$$\begin{aligned}
\frac{d}{ds} \left(T_a \frac{dr}{ds} \right) - T_a r \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \frac{\mu_0}{f(T)} \omega^2 r + 2 \frac{\mu_0}{f(T)} w \omega r \frac{d\varphi}{ds} + F_{or} &= 0 \\
\frac{1}{r} \frac{d}{ds} \left(T_a r^2 \frac{d\varphi}{ds} \right) - 2 \frac{\mu_0}{f(T)} w \omega \frac{dr}{ds} + F_{o\varphi} &= 0 \\
\frac{d}{ds} \left(T_a \frac{dz}{ds} \right) + \frac{\mu_0}{f(T)} g + F_{oz} &= 0 \\
T_a &= T - \frac{\mu_0}{f(T)} w^2 \\
\frac{ds}{dl} &= f(T) \\
\left(\frac{dr}{ds} \right)^2 + r^2 \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dz}{ds} \right)^2 &= 1
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Venujme sa funkcii $f(T)$ zo sústavy rovníc (2.2). Všeobecne závisí predĺženie elementa priadze dl pri statickom zaťažení silou T na rôznych faktoroch, napr. na vlhkosti, teplote, čase, ale i na polohe elementa na priadzi, na hodnote ťahového napätia atď. Vzhľadom k zjednodušujúcim predpokladom môžeme závislosť medzi dĺžkou pôvodného elementu dl na dĺžkou zaťaženého elementu ds vyjadriť len ako funkciu ťahovej sily, čiže $\frac{ds}{dl} = f(T)$.

Odpor vzduchu \mathbf{F}_o vztiahnutý na jednotku dĺžky priadze je možné rozložiť na dve zložky- v smere dotyčnice \mathbf{t} a v smere vektora \mathbf{n} , ktorý je kolmý na dotyčnicu a leží v rovine určenej vektorom rýchlosti priadze \mathbf{v} a vektorom \mathbf{t} . \mathbf{F}_o je možné podľa literatúry [1] vyjadriť Newtonovým vzťahom pre aerodynamickú odporovú silu (2.3), kde C_t a C_n sú bezrozmerné súčinitele odporu vzduchu, v_t a v_n sú zložky relatívnej rýchlosti priadze vzhľadom k prostrediu, v ktorom sa priadza pohybuje, ϱ je merná hmotnosť vzduchu a D je priemer priadze.

$$\mathbf{F}_o = \mathbf{F}_{ot} + \mathbf{F}_{on} = -\frac{1}{2} C_t \varrho D v_t^2 \mathbf{t} - \frac{1}{2} C_n \varrho D v_n^2 \mathbf{n} \tag{2.3}$$

Zložky odporu vzduchu \mathbf{F}_{ot} a \mathbf{F}_{on} v rovnici (2.3) môžeme previesť na zložky F_{or} , $F_{o\varphi}$, F_{oz} v zložkových rovniciach (2.2). Súčiniteľ odporu vzduchu C_n je závislý na Reynoldsovom čísle. Pre obtekanie priadze vzduchom sú tieto závislosti stanovené experimentálne [20] a [12]. Tieto experimenty ukazujú, že pre určitý rozsah Reynoldsovoho čísla, ktorý zodpovedá pracovným rýchlostiam skúmaného zariadenia sa tento súčiniteľ príliš nemení. Silná závislosť C_n na Reynoldsovom čísle sa nachádza

v oblasti nízkych rýchlostí priadze [1], ktoré zodpovedajú malým polomerom priadzového balóna. Časť balóna s malými polomerami nachádzajúca sa v oblasti silnej závislosti na súčiteľ C_n je však súčasne oveľa menej ovplyvňovaná odporom vzduchu, ktorý závisí na štvorci rýchlosti priadze, než časť balóna o väčších polomeroch, kde je rýchlosť priadze podstatne väčšia. Veľká časť balóna sa teda nachádza v oblasti malej závislosti súčiniteľa C_n a predpoklad konštantného C_n je možné akceptovať. K tomuto zjednodušeniu prispievajú experimentálne stanovené krivky balónujúcej priadze, z ktorých vyplýva, že v oblasti malých polomerov balóna sa jedná prakticky o rovinnú krivku a teda vplyv odporu vzduchu je v tejto časti balóna nepatrný.

Vplyv tangenciálnej zložky odporu vzduchu na priadzu je zanedbaný. Tento predpoklad bol skúmaný vo viacerých štúdiách (viď rešeršná časť práce) a bolo zistené, že pre priadzový balón je vplyv tejto sily na profil balóna a ťahovú silu v priadzi zanedbateľný. Publikovaných hodnôt súčiniteľa C_t je veľmi málo. Z hodnôt uvedených v literatúre [20] je patrné, že súčiniteľ C_t je všeobecne menší než jedna desatina hodnoty C_n a často menší než jedna dvadsatina tejto hodnoty. Možno teda skutočne predpokladať, že vplyv odporu vzduchu v smere dotýčnice na tvar krivky balónujúcej priadze je zanedbateľný.

Pohybové rovnice priadze na obmedzovači balóna

Pri pohybe priadze na obmedzovači pôsobí na priadzu okrem síl, ktoré vznikajú pri voľnom balonovaní, ešte reakcia z obmedzovača. Môžeme ju rozložiť na dve zložky – normálovú a smykovú (2.4), kde R je reakcia na priadzu z obmedzovača vztiahnutá na jednotku dĺžky priadze, \mathbf{n}_0 je vektor normály k ploche tvoriacej povrch obmedzovača daný rovnicou $P(r, \varphi, z) = 0$, f_1 je súčiniteľ smykového trenia medzi priadzou a obmedzovačom.

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_N &= R\mathbf{n}_0 \\ \mathbf{F}_S &= -Rf_1 \frac{\mathbf{v}}{v}\end{aligned}\tag{2.4}$$

Pre obmedzovače balóna symetrické podľa osi vzhľadom k ose rotácie z platí, že normálová zložka reakcie leží v meridiánovej rovine. Pohybové rovnice priadze vo voľnom balóne (2.2) môžeme potom upraviť pre pohyb priadze na obmedzovači balóna do všeobecného tvaru (2.5), kde F_{Nr} a F_{Nz} sú zložky normálovej reakcie,

F_{Sr} , $F_{S\varphi}$, F_{Sz} sú zložky smykovej reakcie.

$$\begin{aligned}
\frac{d}{ds} \left(T_a \frac{dr}{ds} \right) - T_a r \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \frac{\mu_0}{f(T)} \omega^2 r + 2 \frac{\mu_0}{f(T)} w \omega r \frac{d\varphi}{ds} + F_{or} - F_{Nr} + F_{Sr} &= 0 \\
\frac{1}{r} \frac{d}{ds} \left(T_a r^2 \frac{d\varphi}{ds} \right) - 2 \frac{\mu_0}{f(T)} w \omega \frac{dr}{ds} + F_{o\varphi} + F_{S\varphi} &= 0 \\
\frac{d}{ds} \left(T_a \frac{dz}{ds} \right) + \frac{\mu_0}{f(T)} g + F_{oz} + F_{Nz} + F_{Sz} &= 0 \\
T_a &= T - \frac{\mu_0}{f(T)} w^2 \\
\frac{ds}{dl} &= f(T) \\
\left(\frac{dr}{ds} \right)^2 + r^2 \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dz}{ds} \right)^2 &= 1 \\
P(r, \varphi, z) &= 0
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Všeobecné pohybové rovnice (2.5) je možné konkrétnizovať pre zvolenú plochu obmedzovača balóna. V prípade skúmaného smyčkového spriadaceho systému sa jedná o valcovú, kužeľovú alebo anuloidovú plochu.

Ako už bolo spomenuté vyššie, pre matematické modelovanie je nutné urobiť vhodné predpoklady. Pre ďalšie postupy uvažujeme, že modelovaná priadza je nepredĺžiteľná, t. j. funkcia $\frac{ds}{dl} = f(T) = 1$. Pre pohyb na všetkých popisovaných plochách platia rovnice (2.6), (2.7), (2.10) a (2.12), kde l je dĺžka nezaťaženej priadze.

$$\begin{aligned}
T_a &= T - \mu_0 w^2 \\
\frac{ds}{dl} &= 1 \\
\left(\frac{dr}{ds} \right)^2 + r^2 \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dz}{ds} \right)^2 &= 1 \\
P(r, \varphi, z) &= 0
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Pre zjednodušenie a zvýšenie prehľadnosti zápisu označíme (2.7).

$$\frac{dr}{ds} = r' \quad \frac{d\varphi}{ds} = \varphi' \quad \frac{dz}{ds} = z' \tag{2.7}$$

Na vyjadrenie zložiek síl zavedme jednotkové vektory súradnicových os \mathbf{r}_0 , φ_0 , \mathbf{z}_0 . Vektor dotyčnice ku krivke balónujúcej priadze \mathbf{t} je potom daný vzťahom (2.8).

$$\mathbf{t} = r' \mathbf{r}_0 + r \varphi' \varphi_0 + z' \mathbf{z}_0 \tag{2.8}$$

Výsledná rýchlosť elementa priadze ds je daná vektorovým súčtom rýchlosti unášivého a relatívneho pohybu priadze podľa vzťahu (2.9).

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_u + \mathbf{w} = r\omega\varphi_0 + wr'\mathbf{r}_0 + wr\varphi'\varphi_0 + wz'\mathbf{z}_0 \quad (2.9)$$

Ďalej platia, s ohľadom na vyššie uvedené, rovnice (2.10), (2.11) a (2.12).

$$\begin{aligned} F_{Sr} &= -fF_N r' \frac{w}{v} \\ F_{S\varphi} &= -fF_N \frac{r(p\omega + w\varphi')}{v} \\ F_{Sz} &= -fF_N z' \frac{w}{v} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{v} = (wr', \quad r(\omega + w\varphi'), \quad wz') \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} F_{or} &= -\frac{1}{2}C_n \varrho d\omega^2 r^3 r' \varphi' (r'^2 + z'^2) \\ F_{o\varphi} &= \frac{1}{2}C_n \varrho d\omega^2 r^2 (r'^2 + z'^2) \\ F_{oz} &= -\frac{1}{2}C_n \varrho d\omega^2 r^3 \varphi' z' (r'^2 + z'^2) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Venujme sa zložkám smykového trenia. Ako už bolo vyššie napísané, pri vysokorýchlostnom dopriadaní sa priadza pohybuje po povrchu obmedzovača. Vzájomný pomer otáčok (resp. uhlových rýchlostí) medzi priadzou a obmedzovačom určuje, či priadza bude obmedzovač predbiehať alebo za ním zaostávať. Na tom potom závisí hlavne tvar smyčky na výstupe z obmedzovača, jej maximálny polomer a priebeh ťahovej sily v jednotlivých úsekoch, ktorými priadza pri tvorbe prechádza. Vplyv tohto vzájomného pomeru otáčok popisuje parameter p v rovnici (2.10). Vystupuje iba v zložke $F_{S\varphi}$, v ostatných zložkách sa zmena pomeru otáčok neprejaví.

Parameter p má hodnotu 1, 0 alebo -1 a stanoví sa z podmienky:

$$\begin{aligned} \text{ak je } \omega_s > \omega_{om} &\Rightarrow \text{priadza obmedzovač predbieha} && \Rightarrow p = -1 \\ \text{ak je } \omega_s < \omega_{om} &\Rightarrow \text{priadza za obmedzovačom zaostáva} && \Rightarrow p = 1 \\ \text{ak je } \omega_s = \omega_{om} &\Rightarrow \text{bez vplyvu rýchlosti obmedzovača} && \Rightarrow p = 0, \end{aligned}$$

kde ω_s je uhlová rýchlosť úseku priadze (smyčky) a ω_{om} je uhlová rýchlosť obmedzovača.

Uhlová rýchlosť smyčky

Odvoďme vzťah pre uhlovú rýchlosť smyčky. Pre hodnotu zákrutu priadze platí vzťah (2.13)

$$Z = \frac{n_v}{w}, \quad (2.13)$$

kde n_v sú otáčky krutného orgánu (vretien) a w je dodávka predpriadze [23]. Podľa Phrixa [19] možno vypočítať počet zákrutov zo vzťahu (2.14)

$$Z = \frac{am \cdot 100}{\sqrt[3]{\mu_0^2}}, \quad (2.14)$$

kde am je zákrutová miera (u bežných priadzí sa jej hodnota pohybuje okolo $50 \text{ ktex}^{2/3}/m$) a μ_0 je jemnosť priadze v tex. Z týchto dvoch vzťahov (2.13) a (2.14) sa vypočíta rýchlosť dodávky stužky vlákien w do procesu navíjania (viď rovnica (2.15)).

$$w = \frac{n_v \sqrt[3]{\mu_0^2}}{am \cdot 100} \quad (2.15)$$

Otáčky smyčky n_s sa určia z 1. podmienky navíjania [17] pomocou rovnice (2.16)

$$n_s = n_v - \frac{w\eta}{\pi d_n}, \quad (2.16)$$

kde d_n je priemer navíjania a stupeň zosúkania η bude uvažovaný rovný jednej. Tento vzťah je obdobou vzťahu pro otáčky bežca u prstencového systému pradenia.

Uhlovú rýchlosť smyčky je potom možné na základe vyššie uvedených rovníc (2.15) a (2.16) vyjadriť pomocou rovnice (2.17).

$$\omega_s = \pi \frac{n_v}{30} \left(1 - \frac{\sqrt[3]{\mu_0^2}}{\pi d_n am \cdot 100} \right) \quad (2.17)$$

Ďalej uveďme vzťahy pre jednotlivé úseky, ktorými prechádza priadza v analyzovanom navíjacom procese.

Pohybové rovnice pre jednotlivé plochy obmedzovača

Pre *valec* platí, že normálová reakcia v smere osi z je nulová a jej celá hodnota sa premieta do radiálneho smeru. Vzhľadom k tomu, že vo vzťahu (2.10) je $r' = 0$, platí pre smykovú reakciu v smere súradnice r , že je rovná nule. Vo vzťahoch (2.5) potom možno stanoviť hodnoty neznámych zložiek reakcií pomocou vzťahov (2.18),

neznáme hodnoty budu určené pomocou vyššie popísaných rovníc (2.6), (2.7), (2.10) a (2.12).

$$\begin{aligned} F_{Nr} &= F_N = -T_a r \varphi'^2 + \mu_0 \omega^2 r + 2\mu_0 w \omega r \varphi' + F_{or} \\ F_{Nz} &= 0 \\ F_{Sr} &= 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Zložky normálovej reakcie pri pohybe priadze po *kuželovej ploche* je možné popísať pomocou rovníc (2.19), kde α je uhol sklonu steny kužeľa.

$$\begin{aligned} F_{Nr} &= F_N \cos \alpha = (-T_a r \varphi'^2 + \mu_0 \omega^2 r + 2\mu_0 w \omega r \varphi' + F_{or} - F_{oz} \tan \alpha) \cos \alpha \\ F_{Nz} &= F_N \sin \alpha = (-T_a r \varphi'^2 + \mu_0 \omega^2 r + 2\mu_0 w \omega r \varphi' + F_{or} - F_{oz} \tan \alpha) \sin \alpha \end{aligned} \quad (2.19)$$

Rovnice popisujúce normálovú reakciu pre plochu tvorenú *anuloidom* (2.20) sú komplikovanejšie ako u valcovej plochy.

$$\begin{aligned} F_{Nr} &= F_N \frac{\sqrt{\sigma^2 - (z - h)^2}}{\sigma} = \frac{1}{\sigma} \frac{\sigma^2 - (z - h)^2}{\frac{F_{Sr}}{F_N} \sqrt{\sigma^2 - (z - h)^2} + \frac{F_{Sz}}{F_N} (z - h) - \sigma} \\ &\quad \left(T_a \frac{1 - r^2 \varphi'^2}{\sqrt{\sigma^2 - (z - h)^2}} + T_a r \varphi' - \mu_0 \omega^2 r - 2\mu_0 w \omega r \varphi' - F_{or} - F_{oz} \frac{z - h}{\sqrt{\sigma^2 - (z - h)^2}} \right) \\ F_{Nz} &= -F_N \frac{z - h}{\sigma} = -\frac{z - h}{\sigma} \frac{\sqrt{\sigma^2 - (z - h)^2}}{\frac{F_{Sr}}{F_N} \sqrt{\sigma^2 - (z - h)^2} + \frac{F_{Sz}}{F_N} (z - h) - \sigma} \\ &\quad \left(T_a \frac{1 - r^2 \varphi'^2}{\sqrt{\sigma^2 - (z - h)^2}} + T_a r \varphi' - \mu_0 \omega^2 r - 2\mu_0 w \omega r \varphi' - F_{or} - F_{oz} \frac{z - h}{\sqrt{\sigma^2 - (z - h)^2}} \right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Polomer krivosti povrchu anuloida je σ a h je konštrukčný rozmer v smere osi z .

Okrajové podmienky

Krivku zakrucujúcej sa priadze v spriadacom systéme je možné rozdeliť z hľadiska silového pôsobenia (obr. 2.1) na niekoľko častí, ktoré sa líšia podľa toho, či dochádza v danom úseku k voľnému balónovaniu priadze, alebo či je priadzový balón nejakým spôsobom obmedzovaný. Venujme pozornosť teda tejto časti spriadaceho systému. Navrhnutý matematický model simuluje proces tvorby priadze v časti medzi vodiacim očkom a návinom priadze na dutinku rotujúceho vretena 6 (viď obr. 1.6 a 1.12).

Časť systému medzi výstupom stužky vlákien z prietahového ústrojenstva 5 a vodiacim očkom nie je v modele priamo zahrnutá, pretože zmena silového pôsobenia na priadzu nie je v tomto úseku podstatná. V modele je však zahrnutý vplyv uhla opásania priadze na vodiacom očku a zvýšenie ťahovej sily dané Eulerovým vzťahom [13], kde T_0 je hodnota ťahovej sily v mieste, kde priadza opúšťa vodiace očko 4, f_0 je súčiniteľ smykového trenia medzi priadzou a vodiacim očkom, T_s je hodnota ťahovej sily nad vodiacim očkom a prakticky je rovná hodnote sily v oblasti stiskovej línie 5, β je celkový uhol opásania na vodiacom očku.

$$T_0 = T_s \cdot e^{f_0\beta} \quad (2.21)$$

Ako už bolo konštatované, priadza prechádza behom svojej tvorby v spriadacom systéme niekoľkými úsekmi, ktoré sa odlišujú hlavne geometrickým tvarom a rôznym silovým pôsobením na priadzu (viď obr. 1.12). Ide o nasledujúce úseky:

- prvý úsek voľne balónujúcej priadze na vstupe do trubičky obmedzovača vrátane prechodu priadze na jeho vnútornú stenu, nie je uvažovaný malý kužeľ na vstupnej časti,
- úsek pohybu priadze na vnútornej stene valcovej trubičky obmedzovača vrátane prechodu na jej kužeľovú koncovú časť, ktorý je modelovaný ostrou hranou s uvažovaním Eulerovho vzťahu pre nárast ťahovej sily,
- úsek pohybu priadze na vnútornej stene kužeľovej časti obmedzovača (uhol 45°) vrátane prechodu priadze na vnútornú anuloidovú stenu obmedzovača,
- úsek pohybu priadze po anuloidovej ploche vrátane prechodu priadze na vnútornú valcovú stenu obmedzovača,
- úsek pohybu priadze po vnútornej strane valcovej časti obmedzovača vrátane prechodu do voľného balónu, ktorý je modelovaný ostrou hranou s uvažovaním Eulerovho vzťahu pre nárast ťahovej sily,
- úsek voľne balónujúcej priadze medzi spodnou hranou obmedzovača a miestom navíjania na dutinke.

Výpočet krivky balónujúcej priadze vedie na okrajovú úlohu pre sústavu obyčajných diferenciálnych rovníc. V bode A_1 (vodiace očko na obr. 2.2) je možné napísať

okrajové podmienky pre dĺžku priadze v balóne $s = 0$

$$\begin{aligned} r(0) &= r_0, \\ \varphi(0) &= 0, \\ z(0) &= 0, \end{aligned} \tag{2.22}$$

kde r_0 je polomer vodiaceho očka. Ak je dĺžka priadze v balóne medzi vodiacim očkom a obmedzovačom s_1 , potom sú okrajové podmienky na hrane obmedzovača

$$\begin{aligned} r(s_1) &= r_1, \\ r'(s_1) &= 0, \end{aligned} \tag{2.23}$$

kde r_1 je polomer prvej valcovej časti obmedzovača. Nasleduje pohyb po valcovej ploche. Ďalšie okrajové podmienky sú pri dosiahnutí dolnej hrany prvej valcovej časti. Označme s_2 ako dĺžku priadze v balóne od vodiaceho očka po dolnú hranu valcovej časti obmedzovača. Platí

$$\begin{aligned} r(s_2) &= r_1, \\ r'(s_2) &= 0, \\ z(s_2) &= h_1, \end{aligned} \tag{2.24}$$

kde h_1 je vzdialenosť dolnej hrany prvej valcovej časti od vodiaceho očka. V prechodovej oblasti je zahrnutý Eulerov vzťah pre ťahovú silu vo vlákne. Po dosiahnutí spodného okraja trubičky obmedzovača nasleduje pohyb po kužeľovej ploche. Ak je splnená podmienka

$$z(s_3) = h_2, \tag{2.25}$$

kde h_2 je vzdialenosť po horný okraj anuloidovej plochy v smere osi z a s_3 dĺžka priadze medzi vodiacim očkom horným okrajom anuloidovej plochy, je výpočet na kužeľovej ploche zastavený. Po pohybe na kužeľovej ploche nasleduje pohyb priadze po anuloidovej ploche. V tomto prípade je výpočet ukončený, ak sú splnené podmienky

$$\begin{aligned} r(s_4) &= r_2, \\ z(s_4) &= h_3, \end{aligned} \tag{2.26}$$

kde s_4 je dĺžka priadze medzi vodiacim očkom a miestom, kde obmedzovač prechádza z anuloidovej plochy do druhej valcovej časti a h_3 je táto vzdialenosť v smere osi

z , polomer valcovej plochy obmedzovača je r_2 . Ďalej pre pohyb po valcovej ploche platí

$$r'(s_4) = 0. \quad (2.27)$$

Posledným miestom na obmedzovači je jeho spodná hrana vo vzdialenosti h_4 od vodiaceho očka. Okrajové podmienky sú v tomto prípade

$$\begin{aligned} r(s_5) &= r_2, \\ r'(s_5) &= 0, \\ z(s_5) &= h_4, \end{aligned} \quad (2.28)$$

pričom s_5 je dĺžka priadze medzi vodiacim očkom a spodnou hranou obmedzovača. V bode navíjania sú nakoniec okrajové podmienky

$$\begin{aligned} r(s_A) &= r_n, \\ z(s_A) &= h_4, \end{aligned} \quad (2.29)$$

kde r_n je polomer navíjania na cievku a s_A je celková dĺžka balónujúcej priadze medzi vodiacim očkom a miestom navíjania na cievke.

Vzhľadom k malej hodnote polomeru spodnej hrany valcovej časti obmedzovača a polomeru zaoblenia ďalších prechodových oblastí je v modeli na týchto miestach uvažovaná ostrá hrana. Zostavený model uvažuje v poslednom úseku voľne balónujúcej priadze pohyb rotujúcej smyčky odohrávajúci sa iba v rovine kolmej na os vretena. Je teda zanedbaný rozvádzací pohyb vretenovej lavice.

Numerické riešenie matematického modelu

Riešenie modelu balónujúcej priadze vedie všeobecne na okrajovú úlohu pre sústavu nelineárnych diferenciálnych rovníc druhého rádu. Tieto rovnice obsahujú hľadané funkcie $r(s)$, $\varphi(s)$, $z(s)$, $T(s)$ a ich prvé, resp. druhé derivácie (2.30).

$$\begin{aligned} r'' &= f(r, \varphi, z, r', \varphi', z', T) \\ \varphi'' &= f(r, \varphi, z, r', \varphi', z', T) \\ T' &= f(r, \varphi, z, r', \varphi', z', T) \\ z' &= \sqrt{1 - r'^2 - r^2 \varphi'^2} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Dĺžka oblúka krivky s tu vystupuje ako nezávisle premenná. Sústavu rovníc (2.2) respektíve (2.5) je možné rozriešiť vzhľadom k najvyšším deriváciám hľadaných funkcií a previesť ju na sústavu rovníc prvého rádu. Okrajová úloha je riešená metódou strelby, kedy charakter okrajových podmienok umožňuje prevod na úlohu s počiatočnými podmienkami.

Výpočet krivky priadze je urobený pre každý úsek spriadaceho systému samostatne, pričom niektoré úseky vedú na okrajovú úlohu (napríklad pohyb priadze po anuloidovej a valcovej ploche obmedzovača). Sústava diferenciálnych rovníc je riešená metódou Runge–Kutta 4. rádu. Pre stanovenie aproximácií chýbajúcich počiatočných hodnôt je použitá iteračná metóda sečien. Základ výpočtu tvorí vonkajší iteračný cyklus pre stanovenie počiatočnej hodnoty ťahovej sily, pričom iterácia je ukončená ak je splnená okrajová podmienka na navíjanej cievke. Chýbajúce počiatočné hodnoty u jednotlivých úsekov sú stanovené pomocou vnútorných iteračných cyklov. Napríklad pre prvý úsek je riešená postupnosť počiatočných úloh s rôznymi hodnotami $r'(0)$, pričom iterácia je ukončená, ak sú splnené okrajové podmienky v mieste prechodu voľne balonujúcej priadze na valcovú plochu trubičky obmedzovača.

Pre riešenie úlohy bol zostavený program v prostredí MATLAB, ktorý umožňuje získať diskkrétne hodnoty funkcií $r(s)$, $\varphi(s)$, $z(s)$ a $T(s)$, z ktorých sme schopní určiť tvar krivky rotujúcej priadze a ťah priadze v ľubovoľnom bode tejto krivky pre všetky úseky spriadaceho systému.

2.1.2 Dynamický model

Dynamický model smyčkového dopriadania vychádza z modelu odvíjania priadze z krížovej cievky, ktorý zostavil Kracík [7].

Zostavený dynamický model bude slúžiť na vyšetrovanie nestabilit v systéme smyčkového dopriadania. Ide hlavne o skúmanie prebiehajúcich dejov pri rozbiehaní zariadenia, pri plynulej zmene polomeru navíjania a započítanie ďalších možných variabilít (napr. nerovnomernosti priadze).

Predpoklady, za ktorých platí zostavený dynamický model:

- priadza je modelovaná ako sústava elementov
- elementy sú spojené na koncoch ideálnymi sférickými klbmi (priadza je ideálne ohybná),

- priadza je hmotne rovnomerná,
- vplyv odporu vzduchu v smere dotýčnice ku krivke balónujúcej priadze je zanedbaný,
- priadza je nepredĺžiteľná.

Na začiatku si zavedme súradnicový systém $Oxyz$. Počiatok súradnicového systému je uprostred vodiaceho očka a os z je totožná s osou vretena. Priadza je modelovaná priestorovou lomenou čiarou, kde vektor (a_i, b_i, c_i) zodpovedá i -temu elementu lomenej čiary. Systém čísel a_i, b_i, c_i predstavuje teda množinu všeobecných súradníc systému. Dĺžka vektorov (a_i, b_i, c_i) je rovná konštante l_e . Celkovo je v systéme n elementov. V priebehu deja sú ale nové elementy vo vodiacom očku pridávané a pri návine na cievku odoberané. Indexovanie elementov je také, že element pohybujúci sa práve z prvého očka je prvý, zatiaľ čo element v mieste navíjania je posledný.

Budeme riešiť pohyb priadze medzi okamihmi výmien elementov hore v očku (bod $(0, A_1)$ na obr. 2.3) a dole na cievke (bod A_2) a ďalej začlenenie nového elementa v istom okamihu a podobne vyradenie elementa dole v mieste navíjania na cievku.

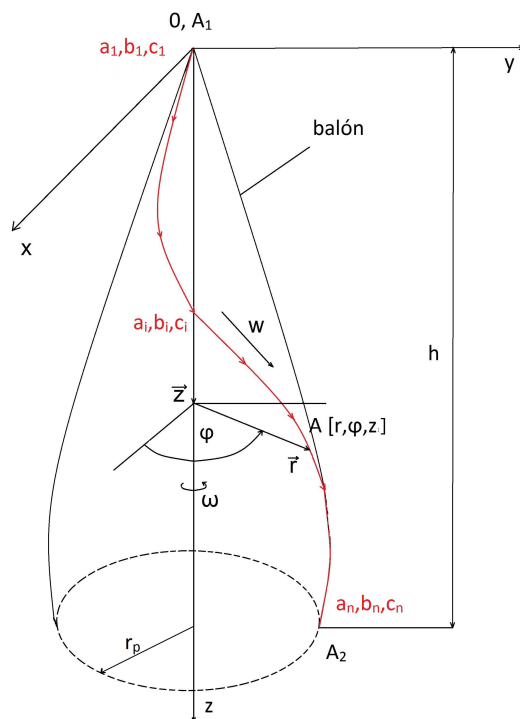
Matematický model

Pohyb priadze medzi okamihmi výmien elementov je riešený systémom Lagrangeových rovníc (2.31) s danou dĺžkou vektorov (a_i, b_i, c_i) .

$$\begin{aligned} \left(\dot{L}_a - L_a - \left[\sum \frac{\lambda_i}{2} (a_i^2 + b_i^2 + c_i^2) \right]_a \right)^T &= F^T \mathbf{x}_a \\ \left(\dot{L}_b - L_b - \left[\sum \frac{\lambda_i}{2} (a_i^2 + b_i^2 + c_i^2) \right]_b \right)^T &= F^T \mathbf{y}_b \\ \left(\dot{L}_c - L_c - \left[\sum \frac{\lambda_i}{2} (a_i^2 + b_i^2 + c_i^2) \right]_c \right)^T &= F^T \mathbf{z}_c \end{aligned} \quad (2.31)$$

V rovnici (2.31) platí, že $L_a = \begin{pmatrix} L_{a_1} \\ L_{a_2} \\ \vdots \\ L_{a_n} \end{pmatrix}$, \mathbf{x}_a je matica transformácie zo zovše-

obecnených súradníc a_i , pre ktorú platí $\mathbf{x}_{an} = \sum_{i=1}^n a_i$, $F^T \mathbf{x}_a$ sú vonkajšie sily (napr. odpor vzduchu) a λ_i sú Lagrangeove multiplikátory. Podobne platí aj pre b, c .



Obr. 2.3: Schéma balónujúcej priadze

Ďalej platí, že $L = T - V$, kde T je kinetická a V potenciálna energia. Sústava (2.31) je riešená potom v tvare (2.32)

$$\begin{aligned} \mu_0 l_e Q \ddot{\mathbf{a}} &= A \lambda + (F^T \mathbf{x}_a)^T, \\ \mu_0 l_e Q \ddot{\mathbf{b}} &= B \lambda + (F^T \mathbf{y}_b)^T, \\ \mu_0 l_e Q \ddot{\mathbf{c}} &= C \lambda + (F^T \mathbf{z}_c)^T - \mu_0 l_e g \begin{pmatrix} n - \frac{1}{2} \\ (n-1) - \frac{1}{2} \\ \vdots \\ 1 - \frac{1}{2} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2.32)$$

kde μ_0 je jemnosť priadze, l_e je dĺžka elementa a g je gravitačné zrýchlenie,

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix}, \quad (2.33)$$

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & a_n \end{pmatrix}, \quad (2.34)$$

$$B = \begin{pmatrix} b_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_n \end{pmatrix}, \quad (2.35)$$

$$C = \begin{pmatrix} c_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & c_n \end{pmatrix}. \quad (2.36)$$

Matica Q (2.45) je čiastočne (konkrétne prvok $Q(1, 1)$) závislá na čase t , čo súvisí so zaradením prvého elementu do výpočtu pri očku a teda prvý element má dĺžku rastúcu do l_e .

Ďalej je potrebné konkrétizovať vstupné sily. Tieto sily sú: odpor vzduchu $\beta \mathbf{res}$, reakcie obmezovača \mathbf{F}_N , trecí odpor pri pohybe priadze po obmezovači \mathbf{F}_S a sila \mathbf{f} , ktorou je navíjaný posledný element na cievku (navíjacia sila).

Zapíšeme konečný tvar sústavy (2.37), kde je vektor \mathbf{I} stĺpcový jedničkový vektor o rozmere n .

$$\begin{aligned} \mu_0 l_e Q \ddot{\mathbf{a}} &= A \lambda + f_a \mathbf{I} + \beta \mathbf{resa} + \mathbf{F}_{Na} + \mathbf{F}_{Sa} \\ \mu_0 l_e Q \ddot{\mathbf{b}} &= B \lambda + f_b \mathbf{I} + \beta \mathbf{resb} + \mathbf{F}_{Nb} + \mathbf{F}_{Sb} \\ \mu_0 l_e Q \ddot{\mathbf{c}} &= C \lambda + f_c \mathbf{I} + \beta \mathbf{resc} + \mathbf{F}_{Nc} + \mathbf{F}_{Sc} - \mu_0 l_e g \begin{pmatrix} n - \frac{1}{2} \\ (n-1) - \frac{1}{2} \\ \vdots \\ 1 - \frac{1}{2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Sila odporu vzduchu je priamo daná stavovými veličinami, tj. súradnicami a ich deriváciami (podľa času). Pre súradnice a_i dostaneme odporovú silu (2.38)

$$\mathbf{resa}^T = - \left(d_1 \dot{\xi}_1^{(N)}, d_2 \dot{\xi}_2^{(N)}, \dots, d_n \dot{\xi}_n^{(N)} \right) \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

kde d_i je veľkosť kolmej zložky rýchlosti stredu elementa, $\dot{\xi}_1^{(N)}$ sú zložky vektora rýchlosti kolmej k elementu. Obdobne môžeme rovnice napísať pre b a pre c .

V prípade reakcie obmezovača, ktorú označujeme pre daný bod (x, y, z) symbolom $(x_i, y_i, 0)civ_i$ a navíjacej sily, sú dané isté požadované účinky týchto síl, ktoré je možné formulovať vhodnými systémami lineárnych algebraických rovníc (2.39), v ktorých sú neznáme zložky síl a ako parametre vystupujú stavové veličiny.

Podobne tiež stanovíme sústavu rovníc pre λ_i z požiadavky $a_i^2 + b_i^2 + c_i^2 = l_e^2$. Dvojím derivovaním podľa času dostaneme druhé derivácie $\ddot{a}_i, \ddot{b}_i, \ddot{c}_i$, ale tie vyjadríme z východzích diferenciálnych rovníc a teda dostaneme vzťah iba medzi stavovými veličinami (2.44).

Na základe uvedeného postupu dostaneme systém rovníc (2.39) pre splnenie požadaviek na silu **civ**

$$\begin{aligned}
& (X_k L_k Q(k)^{-1} X_1 + Y_k L_k Q(k)^{-1} Y_1 + Z_k L_k Q(k)^{-1} Z_1) \mathbf{civ} + \\
& \left(X_k L_k Q(k)^{-1} I, \quad Y_k L_k Q(k)^{-1} I, \quad Z_k L_k Q(k)^{-1} I \right) \mathbf{f} + \\
& + (X_k L_k Q(k)^{-1} A + Y_k L_k Q(k)^{-1} B + Z_k L_k Q(k)^{-1} C) \lambda - \\
& - Z_k L_k Q(k)^{-1} \mu_0 l_e g \begin{pmatrix} n - \frac{1}{2} \\ (n-1) - \frac{1}{2} \\ \vdots \\ 1 - \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \\
& = \mu_0 l_e \left[- \begin{pmatrix} \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 \\ \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 \\ \vdots \\ \dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (r_{1z}^2 + r_1 r_{1zz}) \dot{z}_1^2 \\ (r_{2z}^2 + r_2 r_{2zz}) \dot{z}_2^2 \\ \vdots \\ (r_{kz}^2 + r_k r_{kzz}) \dot{z}_k^2 \end{pmatrix} \right],
\end{aligned} \tag{2.39}$$

kde k je počet elementov na obmezovači, r_i, r_{iz}, r_{izz} sú polomery obmezovača a ich prvé a druhé derivácie podľa súradnice z . Ďalej platí (2.40),

$$\begin{aligned}
X_1 &= \left[\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_k \\ 0 & x_2 & \cdots & x_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & x_k \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} w_{1x}^0 & w_{2x}^0 & \cdots & w_{kx}^0 \\ 0 & w_{2x}^0 & \cdots & w_{kx}^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{kx}^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1\alpha_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_2\alpha_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_k\alpha_k \end{pmatrix} \right], \\
Y_1 &= \left[\begin{pmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_k \\ 0 & y_2 & \cdots & y_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & y_k \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} w_{1y}^0 & w_{2y}^0 & \cdots & w_{ky}^0 \\ 0 & w_{2y}^0 & \cdots & w_{ky}^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{ky}^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1\alpha_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_2\alpha_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_k\alpha_k \end{pmatrix} \right], \\
Z_1 &= \left[- \begin{pmatrix} r_1r_{1z} & r_2r_{2z} & \cdots & r_kr_{kz} \\ 0 & r_2r_{2z} & \cdots & r_kr_{kz} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_kr_{kz} \end{pmatrix} - \right. \\
&\quad \left. - \begin{pmatrix} w_{1z}^0 & w_{2z}^0 & \cdots & w_{kz}^0 \\ 0 & w_{2z}^0 & \cdots & w_{kz}^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{kz}^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1\alpha_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_2\alpha_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_k\alpha_k \end{pmatrix} \right], \\
\end{aligned} \tag{2.40}$$

kde

$$\begin{aligned}
\mathbf{w}_{ix} &= \dot{\mathbf{x}}_i + \omega(t)\mathbf{y}_i, \\
\mathbf{w}_{iy} &= \dot{\mathbf{y}}_i - \omega(t)\mathbf{x}_i, \\
\mathbf{w}_{iz} &= \dot{\mathbf{z}}_i, \\
\mathbf{w}_i^0 &= \frac{\mathbf{w}_i}{|\mathbf{w}_i|},
\end{aligned} \tag{2.41}$$

$\omega(t)$ je rýchlosť, ktorou rotuje balónujúca priadza a α_i sú koeficienty trenia na obmezovači.

Pre úplnosť uvedme, že platí (2.42)

$$\begin{aligned}
X_k &= \begin{pmatrix} x_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & x_k \end{pmatrix}, \\
Y_k &= \begin{pmatrix} y_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & y_k \end{pmatrix}, \\
Z_k &= \begin{pmatrix} -r_1 r_{1z} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -r_k r_{kz} \end{pmatrix}, \\
L_k &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}.
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Počet rovníc zodpovedá počtu elementov na obmedzovači. Matica $Q(k)^{-1}$ je prvých k riadkov matice Q^{-1} .

Pobdobne získame systém rovníc (2.43) pre silu \mathbf{f} (rozmer 3×3) a systém rovníc (2.44) pre λ (rozmer $n \times n$),

$$\begin{aligned}
&\begin{pmatrix} q_r^T X_1 \\ q_r^T Y_1 \\ q_r^T Z_1 \end{pmatrix} \mathbf{civ} + \bar{q}_r \mathbf{f} + \begin{pmatrix} q_r^T A \\ q_r^T B \\ q_r^T C \end{pmatrix} \lambda = \\
&= \mu_0 l_e g \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ q_r^T \begin{pmatrix} n - \frac{1}{2} \\ (n-1) - \frac{1}{2} \\ \vdots \\ 1 - \frac{1}{2} \end{pmatrix} \end{pmatrix} - \beta \begin{pmatrix} q_r^T \mathbf{resa} \\ q_r^T \mathbf{resb} \\ q_r^T \mathbf{resc} \end{pmatrix} + \mu_0 l_e P Z
\end{aligned} \tag{2.43}$$

kde q_r^T je súčtový riadok matice Q^{-1} a \bar{q}_r je súčet prvkov matice Q^{-1} .

Platí, že $\dot{\mathbf{v}}^2 = \dot{\mathbf{x}}^2 + \dot{\mathbf{y}}^2 + \dot{\mathbf{z}}^2$, čo je celková rýchlosť elementov v súradnicovom

systeme x, y, z .

$$\begin{aligned}
& (A Q^{-1} X_1 + B Q^{-1} Y_1 + C Q^{-1} Z_1) \mathbf{civ} + \\
& (A q_s; \quad B q_s; \quad C q_s) \mathbf{f} + S \lambda - C Q^{-1} \mu_0 l_e g \begin{pmatrix} n - \frac{1}{2} \\ (n-1) - \frac{1}{2} \\ \vdots \\ 1 - \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \\
& = \mu_0 l_e \left[\begin{pmatrix} \dot{s}^2 + s \ddot{s} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} - \dot{\mathbf{v}}^2 \right] - \beta (A Q^{-1} \mathbf{resa} + B Q^{-1} \mathbf{resb} + C Q^{-1} \mathbf{resc})
\end{aligned} \tag{2.44}$$

Hodnoty s, \dot{s}, \ddot{s} sú funkciou času a súvisia s maticou (2.45). Platí, že $S = A Q^{-1} A + B Q^{-1} B + C Q^{-1} C$ a q_s je súčet stĺpcov matice Q^{-1} .

Voľba požadovaného zrýchlenia koncového bodu x_n posledného elementu je urobená tak, aby pohyb bodu x_n bol smerovaný dotyčnicovo k povrchu cievky.

Algoritmus riešenia

Na počiatku sú stavové veličiny volené. Riešime algebraický lineárny systém vyššie popísaných rovníc (2.39), (2.43), (2.44) výstupom je riešenie pre \mathbf{civ} , \mathbf{f} a λ . Urobíme krok Runge–Kuttovej metódy 4. rádu a vyriešime systém diferenciálnych rovníc (2.37) pre čas $t + dt$. Týmto získame nové hodnoty polôh a rýchlostí elementov. V nasledujúcom kroku znova spočítame parametre \mathbf{civ} , \mathbf{f} a λ z algebraických rovníc a potom urobíme krok Runge–Kuttovej metódy.

Algebraické rovnice sa líšia podľa toho, o akú oblasť priadze sa jedná. Riešime tu štyri prípady.

Prvý element má dĺžku všeobecne menšiu než hodnota l_e . Keď dosiahne túto hodnotu, mení sa tento element na druhý (prečísľujú sa tiež ďalšie elementy) a pripojuje sa opäť ďalší (prvý) element. Toto sa prejavuje v matici Q , kde je prvý element funkciou času a má tvar (2.45). K pridávaniu nového elementu dôjde v okamihu, ak je

$$s \geq l_e.$$

$$Q = \begin{pmatrix} n & n-1 & \cdots & 1 \\ n-1 & n-1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 - \frac{s(t)^3}{3l^3} & \frac{1}{2} & \cdots & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & \cdots & \frac{1}{2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \cdots & \frac{2}{3} \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

Ďalej nasledujú elementy, ktoré sú vo voľnom balóne. Pre tieto elementy sa riešia rovnice v zjednodušenom tvare, kde nevystupujú členy pre trenie po obmedzovači a nevystupujú tam reakčné sily obmedzovača.

Pri kontakte s povrchom obmedzovača začínajú na balónujúcu priadzu pôsobiť sily, ktoré jej nedovoľujú voľný pohyb v radiálnom smere. Tieto sily súvisia s vektorom \mathbf{civ} .

Ak dôjde koncový bod x_n posledného elementa na cievku, stáva sa posledným elementom (na ktorý pôsobí sila \mathbf{f}) predposledný element s koncovým bodom x_{n-1} . Rýchlosť tohoto posledného bodu je odvíjaná od rýchlosti otáčania cievky pomocou predpísaného zrýchlenia PZ zo vzťahu (2.46).

$$PZ = \frac{1}{dt} (\mathbf{v}_z - \dot{\mathbf{x}}_n) \quad (2.46)$$

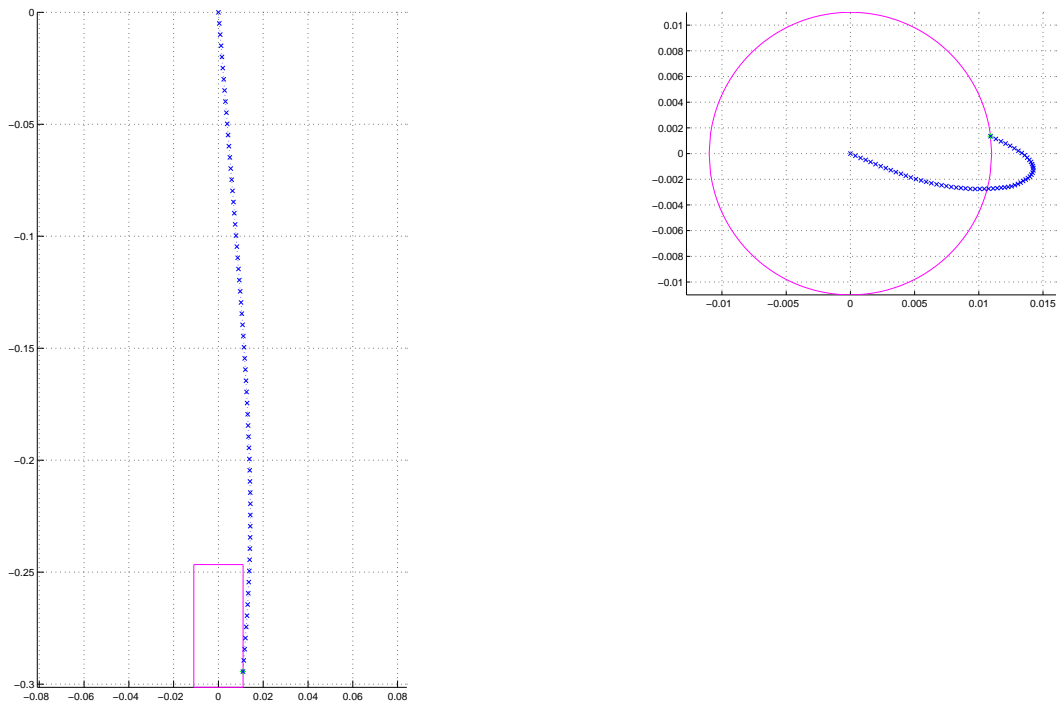
Aby sme stlmili skokové zmeny, hlavne pri pridaní nového elementu, modifikujeme požadovanú rýchlosť \mathbf{v}_z ako vážený priemer danej rýchlosti a predpísanej rýchlosti \mathbf{v}_{pr} podľa vzťahu (2.47), pričom jednotlivé váhy p_1 , p_2 je nutné určiť skusmo tak aby bola splnená podmienka kontinuity.

$$\mathbf{v}_z = p_1 \dot{\mathbf{x}}_n + p_2 \mathbf{v}_{pr} \quad (2.47)$$

Hodnota predpísanej rýchlosti \mathbf{v}_{pr} je odvodená od obvodovej rýchlosti cievky.

Výsledky

Simulácia bola robená pre prípad, kedy je systém rozbíhaný od nulovej rýchlosti. Elementy sú najprv zaťažované iba gravitačnou silou a po vytvorení reťazovky sa začne simulovať pohyb koncového bodu po cievke. Začne sa vytvárať priadzový balón a pridáva sa prvý element so súčasným odobraním posledného elementu. S rastúcim polomerom balóna dôjde k postupnému priľnutiu priadze na povrch obmedzovača a za jeho dolným okrajom sa vytvorí smyčka. V tejto fáze dochádza k stavu, ktorý je uvažovaný v stacionárnom modeli.



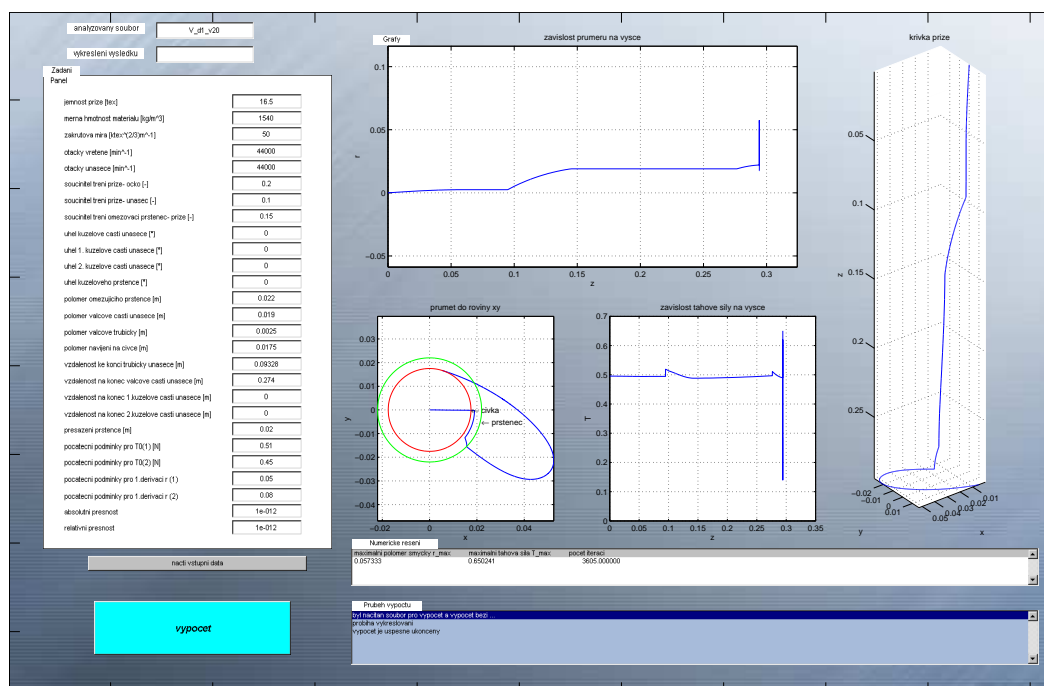
Obr. 2.4: Voľný balón; ružovou farbou je vyznačená cievka, modrou balónujúca priadza; vľavo bokorys, vpravo pôdorys

Na obr. 2.4 je ako príklad zobrazený výsledok výpočtu voľného balóna pre $n = 56$. Pri simulácii pohybu priadze po obmedzovači sme narazili na výskyt nestabilit, ktoré sa prejavovali nedodržaním konštantných dĺžok segmentov diskretizovanej krivky priadze. Týmto problémom sa zaoberal Kalousek [11] a došiel k záveru, že prechody uzlov siete na povrch obmedzovača balóna nie je možné metódou sietí zvládnuť a navrhuje použiť metódu, ktorá využíva konečné prvky k popisu závislostí riešení na časovej a priestorovej premennej, pričom v priestorovej premennej pracuje s Hermiteovými kubickými prvkami.

2.2 Uživatelské rozhranie pre modelovanie a analýzu

Pre prehľadnú prácu s modelom a zobrazenie výsledkov výpočtov, vrátane vstupných parametrov, bolo vytvorené užívateľské rozhranie s využitím GUI. Grafické užívateľské rozhranie (anglicky Graphical User Interface) je grafický nástroj obsahujúci komponenty, ktoré umožňujú ovládať počítačové aplikácie pomocou interaktívnych grafických ovládacích prvkov. Na monitore počítača sú zobrazené okná, v ktorých sú k dispozícii napríklad výsledky výpočtov ako v grafickej, tak i textovej podobe. Užívateľ používa klávesnicu, myš a grafické vstupné prvky ako sú menu, ikony, tlačítka, posuvníky, formuláre a podobne.

Užívateľ nemusí priamo vytvárať program ani písať príkazy do príkazového riadka a často nemá ani prehľad o samotnom zdrojovom kóde. V softvéri MATLAB môže GUI zobrazovať tiež dáta v grafickej alebo tabuľkovej forme a môže združovať jednotlivé komponenty.



Obr. 2.5: GUI pre modelovanie smyčkového dopriadania

GUI môže byť vytvorené dvoma spôsobmi. Prvou možnosťou je GUI naprog-

ramovať, čo je značne komplikované. Druhý spôsob, preferovanejší, je zostavenie grafického užívateľského rozhrania pomocou GUIDE– graphical user interface development environment (prostredie pre vytvorenie grafického užívateľského rozhrania). Podľa užívateľského manuálu, ktorý uvádza na svojich stránkach MathWorks, môžu byť nástroje GUIDE použité na

- Zostavenie GUI

Použitím GUIDE Layout Editoru môže byť GUI navrhnuté jednoducho pomocou myši umiestňovaním GUI komponent, ako sú panely, tlačítka, textové polia, posuvníky, zoznamy atd. a následným zadávaním ich parametrov. GUIDE ukladá zostavený GUI vo FIG súbore.

- Programovanie GUI

GUIDE automaticky generuje M-súbor, ktorý ovláda a kontroluje fungovanie GUI. M-súbor spúšťa GUI a obsahuje štruktúry pre najčastejšie používané callbacky pre každú komponentu– je to príkaz, ktorý je vykonaný, keď užívateľ použije danú komponentu GUI (napr. klikne na tlačítko a tým spustí výpočet). Použitím editora M-súbora môže byť callbacku zadaný taký kód, aby vykonával funkcie, ktoré požadujeme.

Na obr. 2.5 je zobrazené GUI, ktoré bolo vytvorené za účelom práce s matematickým modelom vysokorýchlostného procesu navíjania priadze.

Predložené GUI môžeme rozdeliť na dve časti [10]: oblasť zadávania vstupných dát a oblasť zobrazenia výsledkov. Vo vrchnej časti naľavo (viď obr. 2.5) je pole, do ktorého sa zadáva súbor určený na analýzu (V_d1_v20.m) alebo súbor s výsledkami analýzy (vysledok.mat), ktoré chceme zobrazíť.

Pod týmto je pole, do ktorého sa zadávajú vstupné dáta modelu. Pravá časť je určená na zobrazovanie výsledkov v grafickej podobe, ale tiež pre zobrazenie numerických výstupov, ktoré požadujeme (v tomto prípade hodnoty maximálneho polomeru smyčky a maximálnej ťahovej sily). Úlohou poľa v dolnej časti napravo je informovať užívateľa, v ktorej fáze sa nachádza výpočet, resp. či jednotlivé polia boli vyplnené správne alebo či v priebehu počítania vznikla chyba.

Touto cestou zobrazené výsledky môžu byť uložené v obrázkovom formáte (*.jpg, *.bmp alebo *.eps), vytlačené s vybraným nastavením alebo uložené v numerickej podobe (*.txt).

2.3 Porovnanie smyčkového a prstencového systému dopriadania

V tejto kapitole sa venujeme porovnaniu smyčkového systému a klasického prstencového dopriadania. Pre porovnanie boli zvolené také hodnoty, ktoré zodpovedajú nastaveniu bežne používaných zariadení.

2.3.1 Analýza vplyvu zmeny polomeru navíjania

Cieľom tejto analýzy bolo získanie závislostí maximálneho polomeru a maximálnej ťahovej sily v priadzi na zväčšujúcom sa polomere navíjania na potáč. Posúdenie týchto závislostí je nutné pre určenie predpokladov, ako sa bude daný systém správať pri zmene ďalších parametrov.

Vstupné hodnoty modelu smyčkového dopriadania:

- jemnosť priadze 16 tex,
- otáčky vretien a obmedzovača 44000 ot/min,
- konštrukčné usporiadanie podľa schémy na obr. 1.12.

Ďalej bola urobená simulácia na prstencovom dopriadacom stroji, a výsledky boli porovnané s výsledkami modelu smyčkového dopriadania. Vypriadaná bola priadza o rovnakej jemnosti a zákrute navíjaná na rovnaký potáč. Vstupné hodnoty pre prstencové dopriadanie boli:

- jemnosť priadze 16 tex,
- otáčky vretien 18000 ot/min,
- konštrukčné usporiadanie podľa obr. 2.6.

Hmotnosť bežca bola stanovená tak, aby pre maximálny polomer balóna r_{\max} a polomer obmedzovacieho prstenca r_p platilo $r_{\max} = \langle 1, 2; 1, 25 \rangle r_p$.

Príklad tvaru rotujúcej krivky priadze pre vstupné hodnoty uvedené vyššie a polomer navíjania 17 mm je na obr. 2.6 prezentovaný v troch priemetoch, jednak v priemete do roviny prechádzajúcej osou vretena, kedy každý bod krivky je pootočený o príslušný uhol φ do tejto roviny (závislosť polomeru r na vzdialenosti od vodiaceho očka) a ďalej v priemete do roviny kolmej na osu rotácie a nakoniec i v 3D krivke

	smyčkové		prstencové	
polomer navíjania [10^{-3}m]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]
11	0,0446	0,356	0,0210	0,537
12	0,0468	0,398	0,0215	0,513
13	0,0493	0,447	0,0219	0,496
14	0,0506	0,472	0,0222	0,479
15	0,0530	0,525	0,0225	0,467
16	0,0545	0,560	0,0227	0,457
17	0,0570	0,617	0,0229	0,452

Tab. 2.1: Výsledky analýzy pre zmenu polomeru navíjania

balónujúcej priadze. Ďalej je na obr. 2.6 uvedený priebeh ťahovej sily v priadzi v sledovanej časti spriadaceho systému.

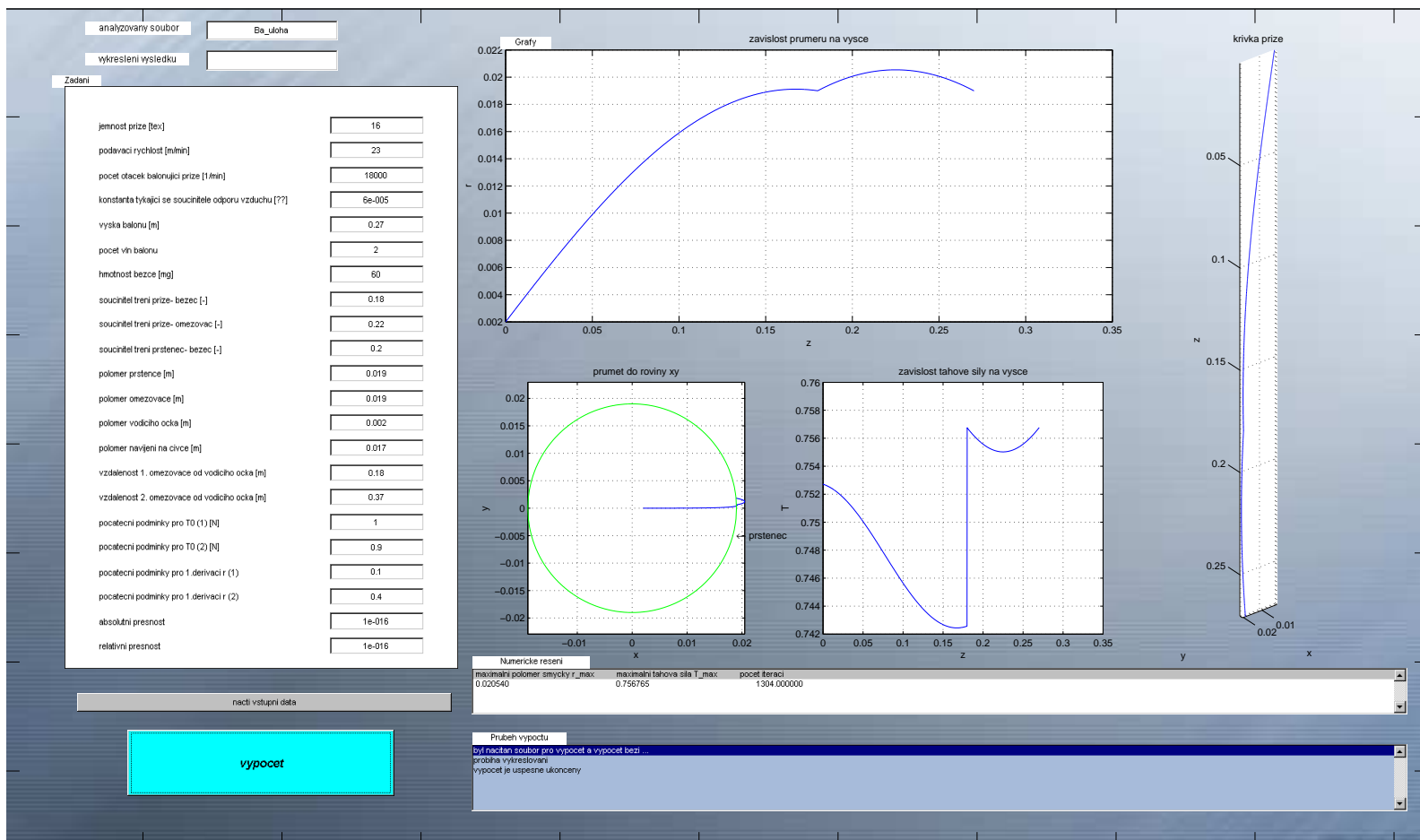
V tabuľke 2.1 sú uvedené výsledky simulácií. Lepšiu výpovednú hodnotu má grafické zobrazenie. Na obr. 2.7 je vykreslená závislosť maximálneho polomeru smyčky r_{\max} a na obr. 2.8 je závislosť maximálnej ťahovej sily F_{\max} na zväčšujúcom sa polomere navíjania. Na ďalších obrázkoch obr. 2.9 a 2.10 sú zobrazené závislosti maximálneho polomeru balónu a maximálnej ťahovej sily na polomere navíjania získané z modelovania prstencového dopriadania.

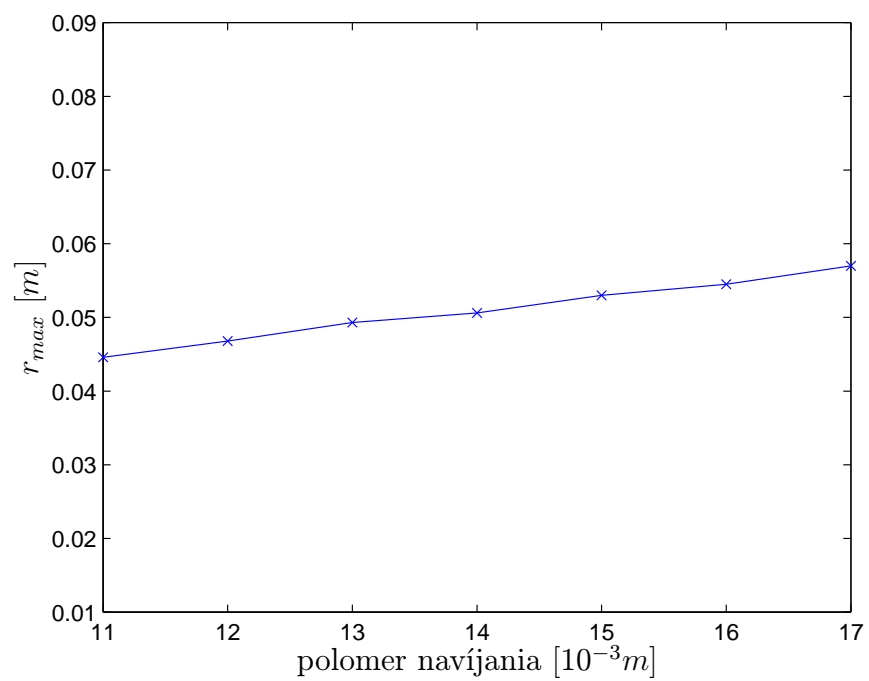
Z výsledkov vyplýva, že u smyčkového dopriadania s rastúcim polomerom navíjania rastie maximálny polomer smyčky aj maximálna ťahová sila. U prstencového dopriadania maximálna ťahová sila v priadzi s rastúcim polomerom navíjania klesá.

2.3.2 Analýza vplyvu zmeny jemností vypriadaných priadzí

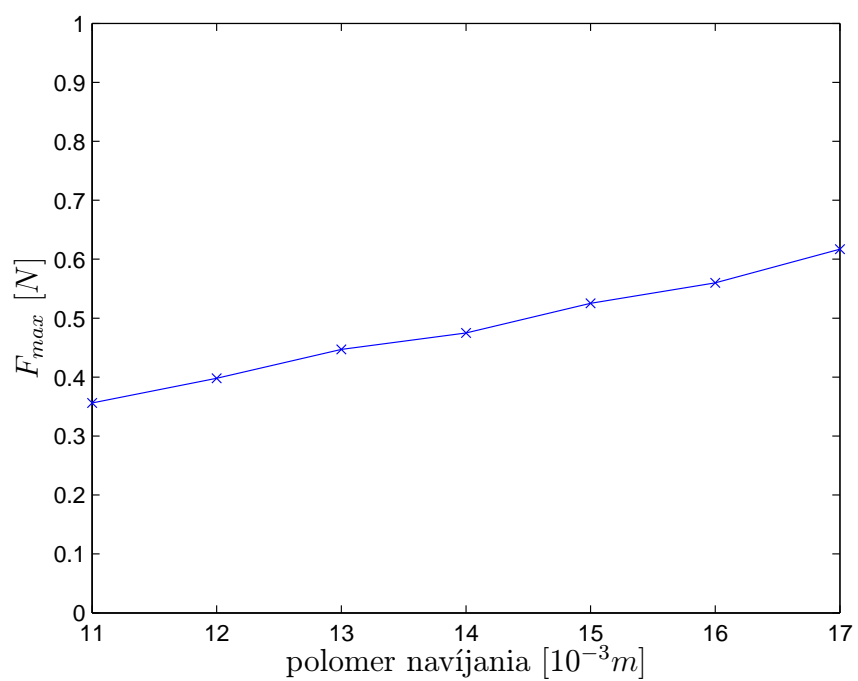
Pre analýzu systémov dopriadania boli zvolené dva zásadné parametre– maximálny polomer balónujúcej priadze a maximálna hodnota ťahovej sily v priadzi. Prvý ovplyvňuje konštrukciu systému druhý potom prietrhovosť priadze. Analyzovaná bola závislosť obidvoch vybraných parametrov na jemnosti priadze pri rovnakých podmienkach. Vstupné hodnoty modelov boli v súlade s ostatnými analýzami (kap. 2.3.1) a analýzy boli urobené pre maximálny polomer navíjania (0,017 m). Hodnoty jemností priadzí pre výpočty boli stanovené v súlade s rozsahom jemností, pre

Obř. 2.6: Simulácia prstencového dopriadania pre polomer navíjania 17mm

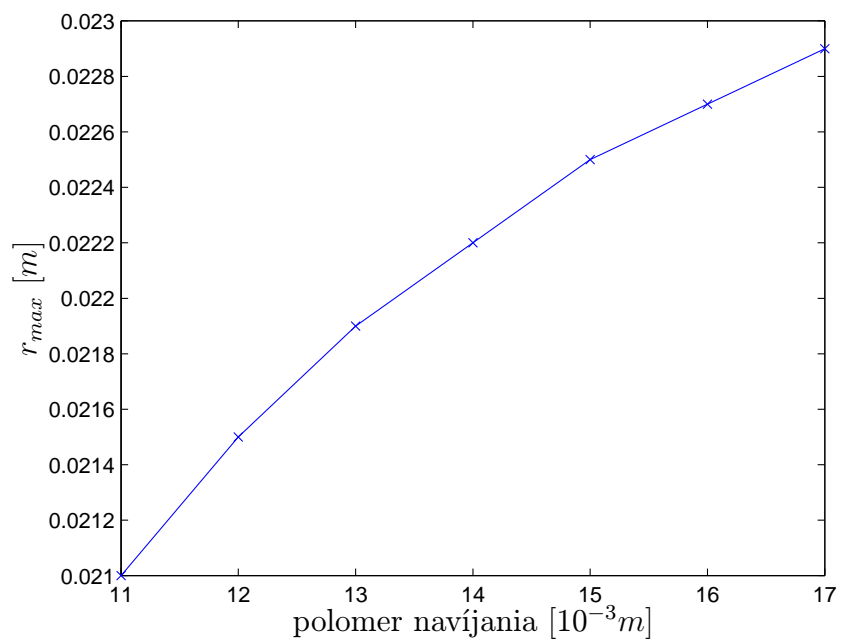




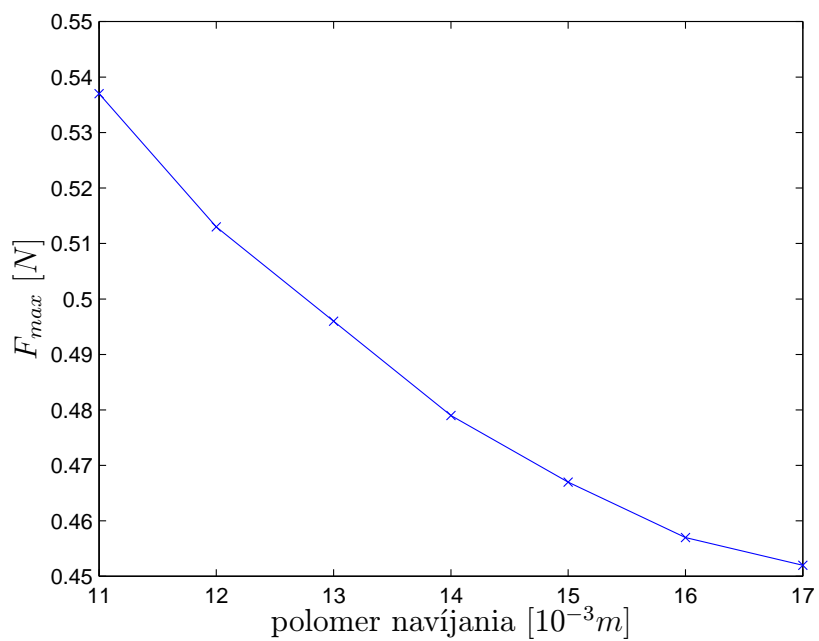
Obr. 2.7: Maximálny polomer smyčky



Obr. 2.8: Maximálna ťahová sila (smyčkové dopriadanie)



Obr. 2.9: Maximálny polomer balóna

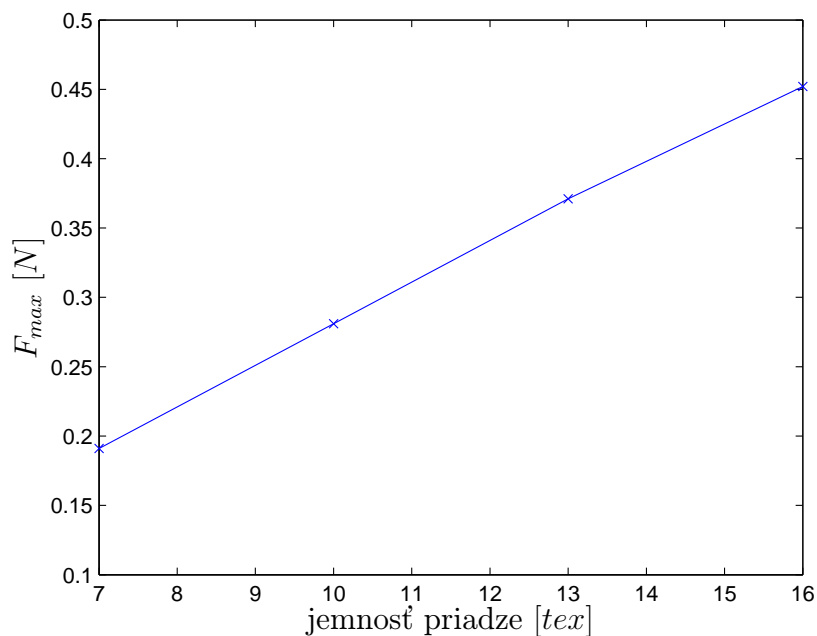


Obr. 2.10: Maximálna ťahová sila (prstencové dopriadenie)

ktoré sa predpokladá využitie systému smyčkového dopriadania. Výsledky analýzy sú uvedené vo forme grafov na obr. 2.12, 2.13, a 2.11 a v tabuľke 2.2.

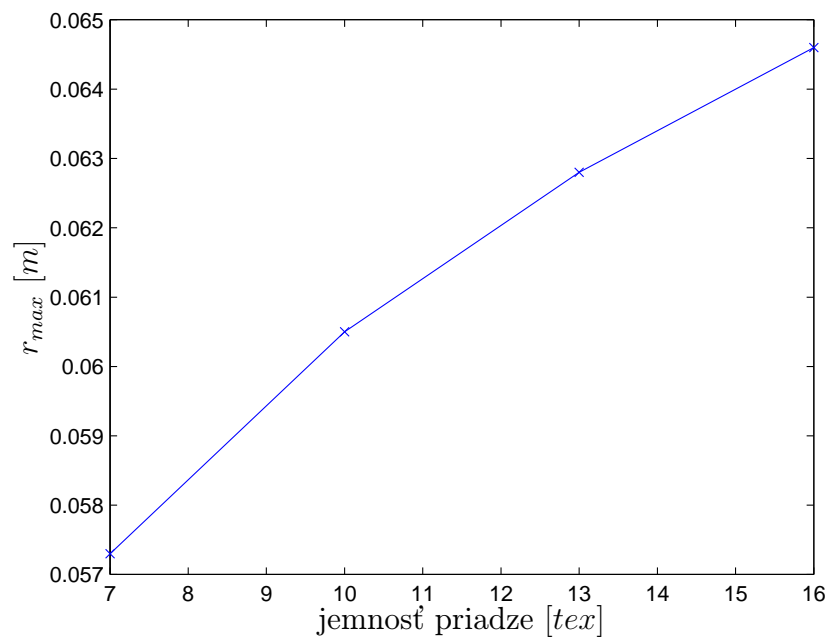
jemnosť priadze [tex]	smyčkové		prstencové	
	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]
7	0,0573	0,261	0,0230	0,191
10	0,0605	0,414	0,0230	0,281
13	0,0628	0,578	0,0230	0,371
16	0,0646	0,749	0,0230	0,452

Tab. 2.2: Výsledky analýzy vplyvu zmeny jemnosti priadze

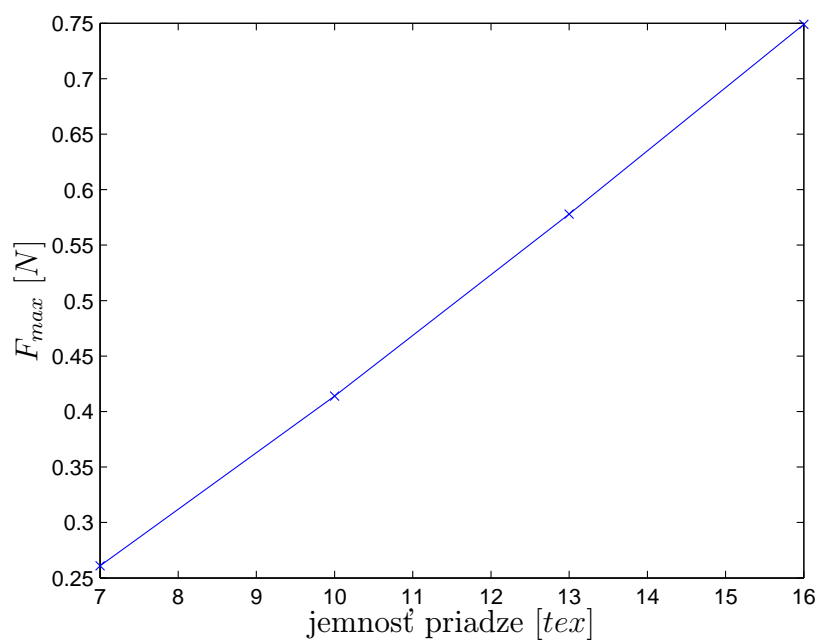


Obr. 2.11: Závislosť maximálnej ťahovej sily na jemnosti priadze (prstencové dopriadanie)

Z urobenej analýzy smyčkového dopriadania je možné vyvodiť nasledujúce závery. Maximálna hodnota ťahovej sily rastie významne s rastúcou jemnosťou priadze. Napr. pre priadzu jemnosti 16 tex sa zvýši takmer trikrát oproti priadzi jemnosti 7 tex (viď obr. 2.13). Ťahová sila je daná priamo otáčkami vretien a môžeme ju regulovať len zmenou týchto otáčok. Smyčkové pradenie má určitú nevýhodu oproti



Obr. 2.12: Závislosť maximálneho polomeru smyčky na jemnosti priadze



Obr. 2.13: Závislosť maximálnej ťahovej sily na jemnosti priadze (smyčkové dopriadanie)

prstencovému pradeniu, u ktorého je možné voľbou bežca ovplyvniť pri daných otáčkach vretien hodnotu ťahovej sily. Z výsledkov analýzy prstencového dopriadania (tab. 2.2) vyplýva, že ťahová sila v priadzi rastie s rastúcou jemnosťou priadze (viď. obr. 2.11). Maximálny polomer balónujúcej priadze r_{\max} je daný podmienkou, že má byť v intervale $r_{\max} = \langle 1, 2; 1, 25 \rangle r_p$, kde r_p je polomer obmedzovacieho prstenca.

2.3.3 Analýza vplyvu koeficientu zákrutu

Ďalšou z analýz je sledovanie správania sa systému smýčkového a prstencového dopriadania pri tvorbe priadzi s rôznym zákrutovým koeficientom, čiže s rôznym počtom zákrutov. Závislosť medzi zákrutovým koeficientom a zákrutom je daná vzťahom (2.14), takže pri konštantnej jemnosti sa so zmenou zákrutového koeficientu mení samotný počet zákrutov.

Okrem Phrixovho zákrutového koeficientu sa v praxi používa aj Köchlinov zákrutový koeficient [14]. Tieto zákrutové koeficienty sa bežne v praxi používajú ako konštanty závisiace na materiáli, technológii a na ďalšom využití. Pre priadze sa spravidla používa Phrixov zákrutový koeficient a Köchlinov zákrutový koeficient sa používa pre hrubšie útvary, napr. predpriadze.

	am=55/3 $ktex^{2/3}/m$		am=55 $ktex^{2/3}/m$		am=55x3 $ktex^{2/3}/m$	
r_n [$10^{-3}\mathbf{m}$]	$\mathbf{r_{\max}}$ [m]	$\mathbf{F_{\max}}$ [N]	$\mathbf{r_{\max}}$ [m]	$\mathbf{F_{\max}}$ [N]	$\mathbf{r_{\max}}$ [m]	$\mathbf{F_{\max}}$ [N]
11	0,0423	0,197	0,0418	0,199	0,0419	0,203
12	0,0440	0,217	0,0435	0,219	0,0437	0,224
13	0,0457	0,237	0,0452	0,242	0,0455	0,243
14	0,0474	0,258	0,0472	0,264	0,0473	0,267
15	0,0497	0,288	0,0491	0,290	0,0494	0,291
16	0,0516	0,311	0,0509	0,313	0,0513	0,318
17	0,0535	0,335	0,0530	0,342	0,0532	0,345

Tab. 2.3: Výsledky analýzy pre smýčkové dopriadanie

Boli zvolené 3 hodnoty Phrixových zákrutových koeficientov: bežne používaný ($55ktex^{2/3}/m$), jeho tretina a trojnásobok. Tieto hodnoty nie sú v praxi použiteľné, ale boli zvolené pre získanie predstavy, akou mierou sa ich hodnoty prejavajú v skúmanom systéme. Jemnosť priadze je 10tex a ostatné parametre zodpovedajú

nastaveniu vid' kap. 2.3.1.

Bolo skúmané, ako sa budu vyvíjať sledované parametre (maximálny polomer balónujúcej priadze a maximálna ťahová sila v priadzi) v závislosti na zmene polomeru navíjania.

	am=55/3 $ktex^{2/3}/m$		am=55 $ktex^{2/3}/m$		am=55x3 $ktex^{2/3}/m$	
r_n [10^{-3}m]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]
11	0,0210	0,312	0,0211	0,333	0,0210	0,339
12	0,0212	0,301	0,0212	0,319	0,0212	0,324
13	0,0214	0,291	0,0215	0,308	0,0214	0,312
14	0,0219	0,283	0,0220	0,298	0,0220	0,302
15	0,0223	0,276	0,0224	0,291	0,0224	0,294
16	0,0227	0,272	0,0228	0,284	0,0227	0,288
17	0,0230	0,269	0,0230	0,281	0,0230	0,284

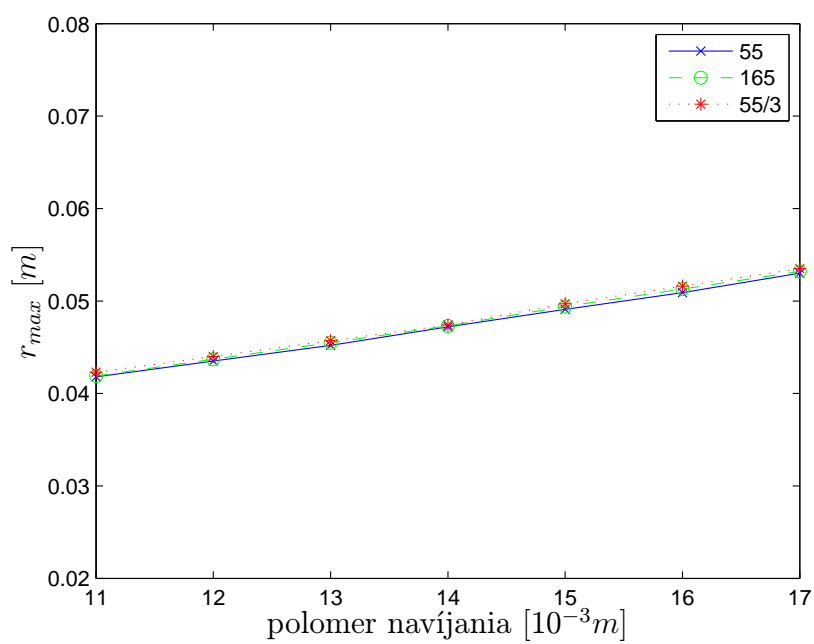
Tab. 2.4: Výsledky analýzy pre prstencové dopriadanie

Výsledky sú uvedené v tabuľkách (2.3 a 2.4), kde r_n je polomer navíjania a v grafoch 2.14 a 2.15.

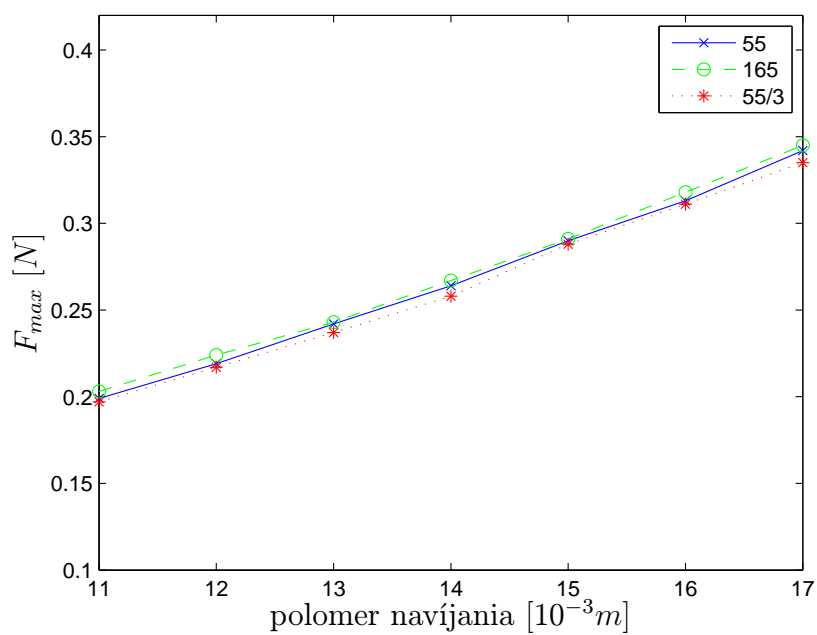
Z výsledkov vyplýva, že maximálny polomer balónujúcej priadze ani maximálna ťahová sila v priadzi sa so zmenou počtu zákrutov výrazne nemení. Najvýraznejší rozdiel hodnôt je u maximálnej ťahovej sily pri prstencovom dopriadaní, kde sa ale so zväčšujúcim zákrutovým koeficientom znižuje nárast v ťahových silách (viď obr. 2.17 a tab. 2.4).

2.4 Analýza smyčkového dopriadania

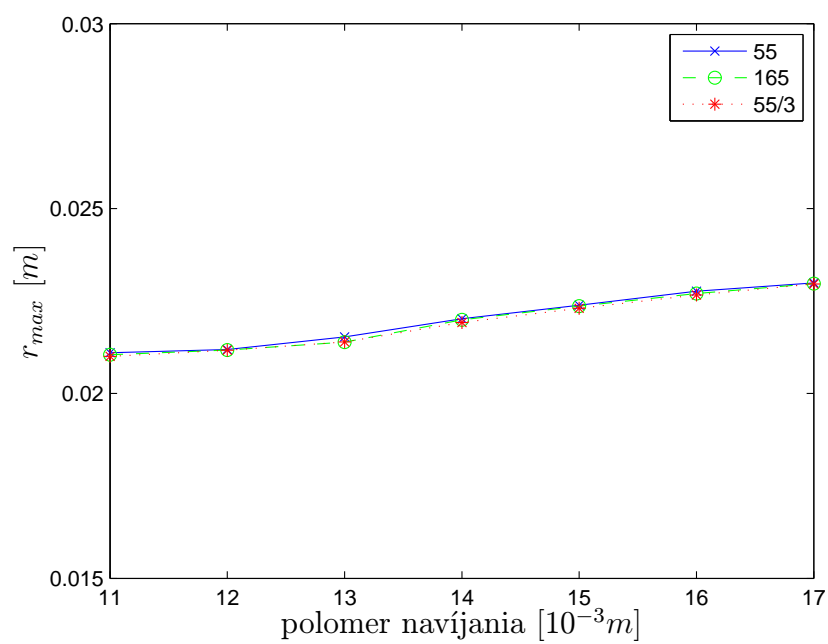
Analýzy vysokorychlostného procesu navíjania u smyčkového systému dopriadania vedú k následnej optimalizácii parametrov. Optimalizovať môžeme jednak technologické parametre, ale aj geometrické. V prvom prípade sa zameriame na sledovanie vplyvu zmien rozmerov obmedzovacieho telesa na systém smyčkového dopriadania a testovanie rôznych koeficientov trenia na statickom prstenci. Z technologických parametrov boli ďalej zvolené analýzy vplyvu počtu otáčok a budeme skúmať správanie sa systému s rôznymi jemnosťami pri zmene polomeru navíjania. Časť analýz bude



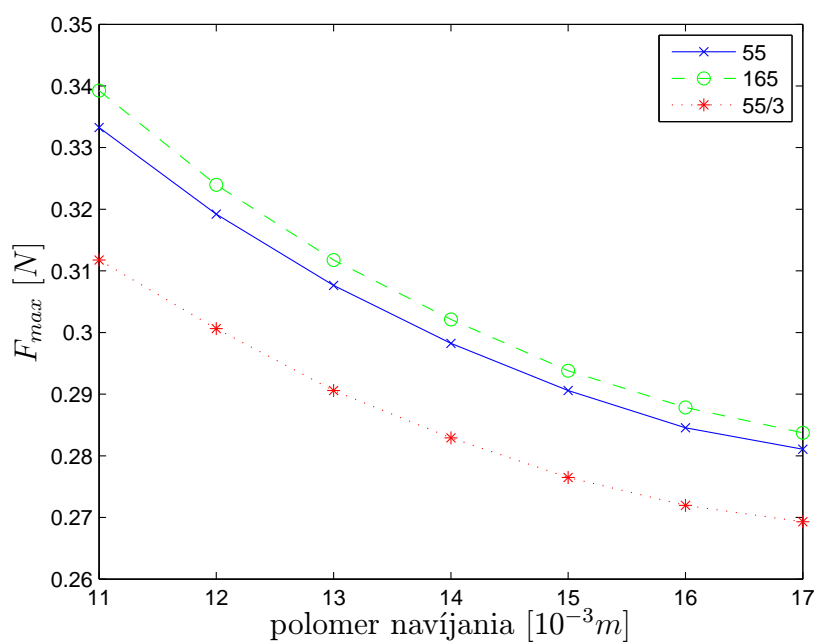
Obr. 2.14: Závislosť maximálneho polomeru smyčky na zmene polomeru navíjania pre rôzny počet zákrutov



Obr. 2.15: Závislosť maximálnej ťahovej sily na zmene polomeru navíjania pre rôzny počet zákrutov (smyčkové dopriadanie)



Obr. 2.16: Závislosť maximálneho polomeru balóna na zmene polomeru navíjania pre rôzny počet zákrutov



Obr. 2.17: Závislosť maximálnej ťahovej sily na zmene polomeru navíjania pre rôzny počet zákrutov (prstencové dopriadenie)

urobených pre dva tvary obmedzovača, pôvodný tvar bol nahradený novým konštrukčným usporiadaním. Toto nové usporiadanie bolo vyvinuté experimentálne a na základe výsledkov analýz môžeme posúdiť, či zjednodušením tvaru došlo k úspore vybraných parametrov dopriadacieho procesu.

2.4.1 Analýza vplyvu zmeny polomera hornej valcovej časti obmedzovača

Tvar obmedzovača (obr. 1.12) bol určený experimentálne a úlohou tejto analýzy je stanoviť, či priemer hornej valcovej časti obmedzovača je z hľadiska maximálneho polomeru smyčky a maximálnej ťahovej sily v priadzi optimálny, prípadne určiť veľkosť vplyvu charakteristického rozmeru na sledovaný systém.

polomer hornej valcovej časti [10^{-4}m]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]
20	0,0449	0,362
25	0,0449	0,363
30	0,0449	0,363
35	0,0449	0,363

Tab. 2.5: Výsledky analýzy pre zmenu polomeru hornej valcovej časti obmedzovača

Vstupné parametre modelu boli rovnaké ako v kap. 2.3.1, polomer navíjania bol 11 mm. Štandardne je polomer hornej valcovej časti podľa schémy na obr. 1.12 2,5 mm. V tabuľke 2.5 sú uvedené testované hodnoty polomeru a výsledky výpočtov.

Z uvedených výsledkov (tab. 2.5) vyplýva, že zmena priemeru hornej valcovej časti obmedzovacieho telesa nemá v danom rozsahu prakticky žiadny vplyv na sledované hodnoty systému smyčkového dopriadania.

2.4.2 Analýza vplyvu zmeny dĺžky valcovej časti obmedzovača

Z geometrického hľadiska je zaujímavé zaoberať sa ešte rozmermi valcovej časti obmedzovača. Vzhľadom k tomu, že jej polomer je daný maximálnym polomerom navíjania na cievku, prichádza do úvahy analýza zmeny dĺžkového rozmeru. Vstupné

hodnoty boli rovnaké ako v kap. 2.3.1 a 2.4.1. V tab. 2.6 sú uvedené testované rozmery a výsledky simulácií.

dĺžka valcovej časti [10^{-3}m]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]
270	0,0448	0,362
280	0,0450	0,364
290	0,0452	0,366
300	0,0454	0,368

Tab. 2.6: Výsledky analýzy pre zmenu dĺžky valcovej časti unášača

Z údajov v tab. 2.6, obr. 2.18 a obr. 2.19 vyplýva, že s rastúcou dĺžkou valcovej časti obmedzovača rastie maximálna ťahová sila a nepatrne i maximálny polomer smyčky. Je to dané tým, že rastie plocha, po ktorej sa pohybuje priadza a tým pádom sa zvyšuje trenie a rastie ťahová sila.

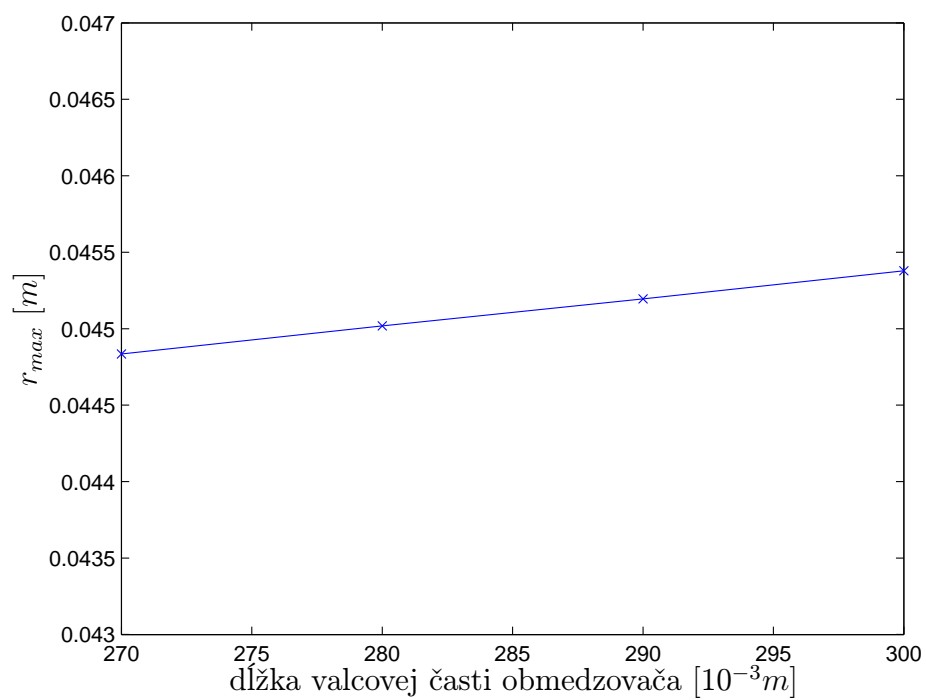
2.4.3 Analýza vplyvu vysunutia statického prstenca

Pôvodná idea smyčkového dopriadania podľa obr. 1.7 obsahovala možnosť regulácie maximálneho polomeru smyčky. U prstencového dopriadania je táto regulácia možná prostredníctvom voľby hmotnosti bežca. Pre bežec s menšou hmotnosťou má balón väčší polomer, pre väčšiu hmotnosť menší polomer. U smyčkového systému dopriadania žiadny takýto element neexistuje, tak autori vložili za rotujúce obmedzovacie teleso statický prstenec a pomocou jeho polohy (vysunutia) regulovali maximálny polomer smyčky.

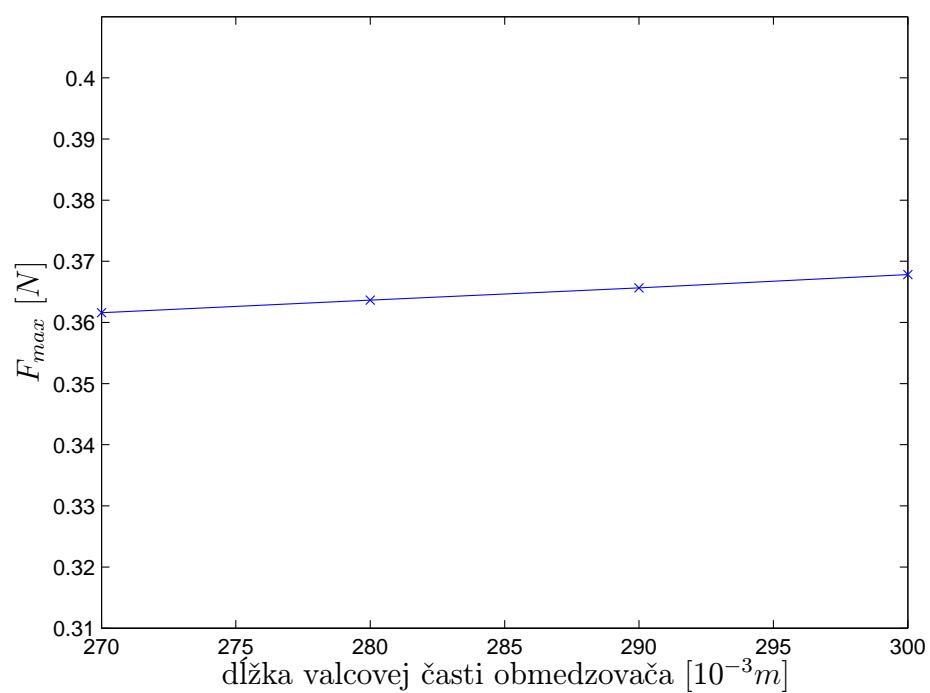
Úlohou tejto analýzy bolo v pôvodnom usporiadaní určiť, aký vplyv má vysunutie statického prstenca na vlastnosti smyčky. Pre nový tvar obmedzovača (obr. 1.12) zistíme, či by prstenec významne ovplyvnil ťahovú silu v priadzi a maximálny polomer smyčky. Budeme sa teda zaoberať vplyvom vysunutia statického prstenca na maximálny polomer a maximálnu ťahovú silu vo vytvárannej priadzi.

Analyzovaný model má vstupné hodnoty v súlade so vstupnými hodnotami uvedenými v kap. 2.3.1 a 2.4.1, pričom je testované konštrukčné usporiadanie podľa schémy na obr. 1.7 a obr. 1.12.

Výsledky analýzy sú pre jednotlivé hodnoty presahu prstenca uvedené vo forme tabuľky 2.7 a 2.8. Z týchto výsledkov vyplýva, že vplyv vysunutia prstenca je ne-



Obr. 2.18: Maximálny polomer



Obr. 2.19: Maximálna ťahová sila

významný. Rozdiely medzi maximálnymi polomermi sú v ráde desiatín milimetra. Nerovnomernosť reálnej priadze vplýva na maximálnu ťahovú silu v rádoch desiatín cN , preto môžeme pokladať rozdiely v maximálnych ťahových silách tiež za nevýznamné.

vysunutie prstenca [$10^{-3}m$]	r_{max} [m]	F_{max} [N]
0	0,0443	0,355
5	0,0439	0,351
10	0,0437	0,348
15	0,0434	0,345
20	0,0433	0,342

Tab. 2.7: Výsledky analýzy pre tvar obmedzovača podľa obr. 1.7

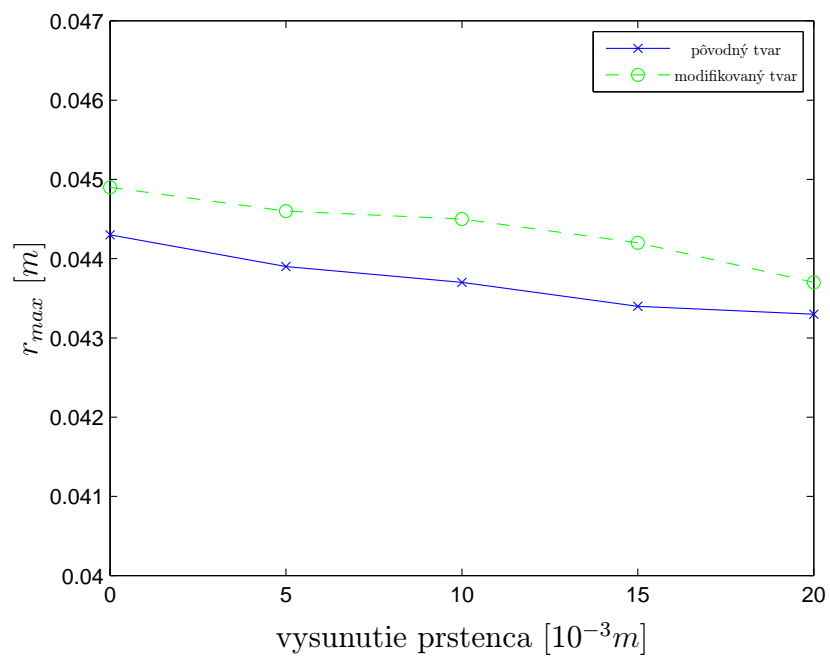
vysunutie prstenca [$10^{-3}m$]	r_{max} [m]	F_{max} [N]
0	0,0449	0,363
5	0,0446	0,358
10	0,0445	0,357
15	0,0442	0,354
20	0,0437	0,350

Tab. 2.8: Výsledky analýzy pre tvar obmedzovača podľa obr. 1.12

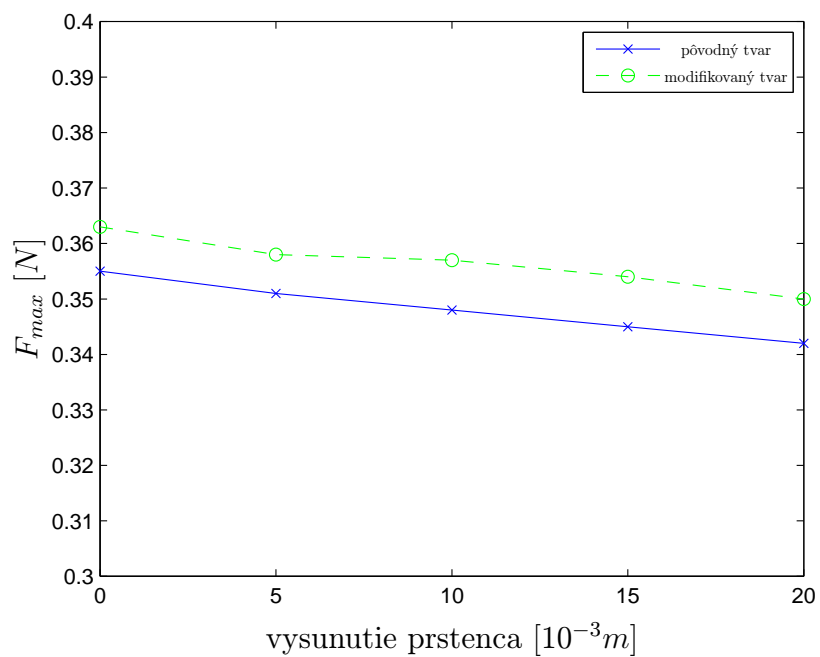
Ak sa pozrieme na výsledky simulácií vzhľadom k tvaru obmedzovača (obr. 2.20, obr.2.21), tak hodnoty maximálneho polomeru aj maximálnej ťahovej sily sú pre nový tvar obmedzovača o málo väčšie. Je nutné ale uvážiť tvarovú zložitosť pôvodného obmedzovacieho telesa. Rozdiel v hodnotách maximálneho polomeru smyčky a maximálnej ťahovej sily je taký malý, že je možné považovať zjednodušenie tvaru obmedzovača z konštrukčného hľadiska skutočne za výhodnejšie.

2.4.4 Analýza vplyvu koeficientu trenia na prstenci

Táto analýza súvisí s predchádzajúcou. Jej úlohou je určiť mieru vplyvu vlastností povrchu statického prstenca na vlastnosti smyčky. Rozsahy jednotlivých hodnôt boli zadane autormi systému smyčkového dopriania a vychádzajú z reálne použitých parametrov.



Obr. 2.20: Maximálny polomer smyčky



Obr. 2.21: Maximálna ťahová sila

Pre jednotlivé simulácie boli zvolené parametre, ktorých hodnoty sú uvedené v tabuľke 2.9, ostatné dáta boli pre výpočty rovnaké ako v kapitole 2.3.1.

Koeficient trenia priadze na stene obmedzovača je $f_1 = 0,1$ (duralový obmedzovač). Veľký priemer návinu je stanovený na hodnotu 35 mm a malý priemer návinu na 22 mm. Pre výpočet boli vybrané 2 veľkosti koeficienta trenia priadze na podpernom prstenci.

otáčky vretena [ot/min]	jemnosť [tex]	vysunutie prstenca [mm]
50000	5	6
48000	7,4	8
46000	10	12
45000	12	15
44000	16,5	20

Tab. 2.9: Zvolené hodnoty

Varianta A uvažuje koeficient trenia priadze na podpernom prstenci $f = 0,15$ (keramický prstenec). Vo variante B je koeficient trenia priadze na podpernom prstenci $f = 0,05$ (prstenec s vrstvou DLC). DLC je špeciálna povrchová vrstva upravujúca vlastnosti materiálu [21].

jemnosť priadze [tex]	priemer návinu 0,022 m		priemer návinu 0,035 m	
	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]
5	0,0386	0,110	0,0497	0,196
7,4	0,0406	0,165	0,0524	0,294
10	0,0417	0,218	0,0542	0,388
12	0,0424	0,258	0,0554	0,465
16,5	0,0436	0,358	0,0573	0,650

Tab. 2.10: Varianta A: Koeficient trenia priadze na podpernom prstenci 0,15 (keramický prstenec)

Výsledky analýzy sú uvedené ve forme tabuliek 2.10 a 2.11. Porovnanie týchto výsledkov ukazuje na záver, že s rastúcim koeficientom trenia klesá nielen maximálny polomer rotujúcej smyčky r_{\max} , ale aj maximálna ťahová sila F_{\max} . Ďalej z analýzy

vyplýva, že maximálne hodnoty ťahovej sily a maximálne polomery rotujúcej smyčky sú dosahované na maximálnom priemere navíjania.

Pre ilustráciu porovnajme výsledky simulácií pre oba koeficienty trenia v prípade, že vezmeme hodnoty pre jemnosť priadze 16,5 tex a veľký priemer návinu. Hodnoty maximálneho polomeru a maximálnej ťahovej sily sú vyššie pre menší koeficient trenia. To znamená, že použitie podperného prstenca s drsnejším povrchom je z tohoto hľadiska priaznivejšie.

jemnosť priadze [tex]	priemer návinu 0,022 m		priemer návinu 0,035 m	
	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]
5	0,0396	0,113	0,0508	0,201
7,4	0,0418	0,171	0,0536	0,302
10	0,0430	0,227	0,0557	0,402
12	0,0442	0,274	0,0570	0,482
16,5	0,0458	0,384	0,0589	0,674

Tab. 2.11: Varianta B: Koeficient trenia priadze na podpernom prstenci 0,05 (prstenec s vrstvou DLC)

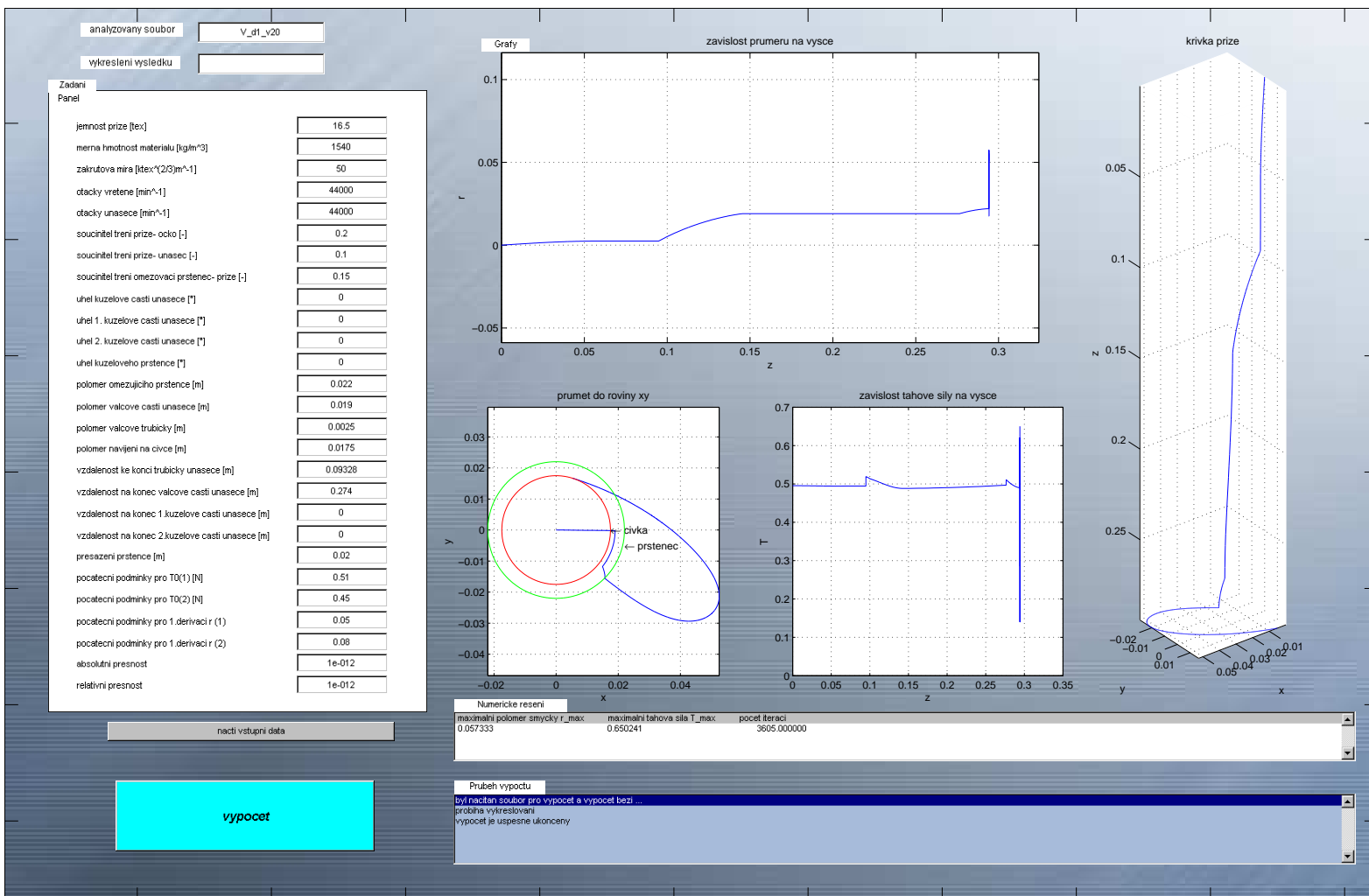
Príklad tvaru rotujúcej krivky pre vstupné otáčky vretien aj obmedzovača 44000 ot/min, jemnosť priadze 16,5 tex a koeficient trenia $f = 0,15$ je na obr. 2.22 prezentovaný v troch priemetoch, jednak v priemete do roviny prechádzajúcej osou vretena, kedy každý bod krivky je pootočený o príslušný uhol φ do tejto roviny (závislosť polomeru r na vzdialenosti od vodiaceho očka) a ďalej v priemete do roviny kolmej na osu rotácie a nakoniec i v 3D krivke balónujúcej priadze. Ďalej je v grafe uvedený priebeh ťahovej sily v priadzi v sledovanej časti spriadacieho systému.

2.4.5 Analýza vplyvu pomeru otáčok smyčky a obmedzovača

V systéme smyčkového dopriadania je okrem vretena poháňaný aj obmedzovač. Ak by bol obmedzovač stacionárny, tak by pri vysokých rýchlostiach, pri ktorých je zariadenie prevádzkované, dochádzalo k vysokému mechanickému a tepelnému namáhaniu priadze. Z tohoto hľadiska môže systém smyčkového dopriadania fungovať v dvoch režimoch. V prvom prípade je rýchlosť obmedzovacieho telesa menšia ako

Obr. 2.22: Výsledky analýzy rotujúcej priadze (súčiniteľ trenia 0,05, malý priemer navíjania, 45000 ot/min, 12 tex, 15 mm vysunutie prstenca)

73



rýchlosť smyčky priadze a v druhom prípade sa obmedzovač otáča rýchlejšie než smyčka. Existuje este teoretická tretia možnosť, kedy by bola rýchlosť obmedzovača a smyčky priadze rovnaká, ale v praxi k tomu nedôjde.

Cieľom tejto analýzy je posúdiť, ktoré usporiadanie je optimálne. Analyzovaný model má vstupné hodnoty

- jemnosť priadze 16,5 tex,
- otáčky vretien 44000 ot/min,
- veľký priemer návinu 35 mm,
- konštrukčné usporiadanie podľa schémy na obr. 1.12.

Pre navíjací proces u smyčkového pradenia je charakteristická voľná časť balónujúcej priadze v tvare smyčky, u ktorej sledujeme zmenu maximálneho polomeru. Ďalej sledujeme zmenu maximálnej ťahovej sily v závislosti na pomere otáčok medzi obmedzovačom a vretenom (resp. smyčkou, ktorej otáčky sú dané otáčkami vretena pre daný počet zákrutov).

	otáčky [ot/min]		
	varianta 1	varianta 2	varianta 3
obmedzovač	—	40000	48000
vreteno	44000	44000	44000

Tab. 2.12: Varianty výpočtov

S využitím zostaveného matematického modelu balónujúcej priadze sú sledované tri varianty dopriadacieho procesu s rôznymi otáčkami obmedzovača pri otáčkach vretien 44000 ot/min. Jednotlivé varianty sú uvedené v tabuľke 2.12.

	uhlová rýchlosť [rad/s]		
	varianta 1	varianta 2	varianta 3
obmedzovač	4553	4188	5026
smyčka	4553	4553	4553

Tab. 2.13: Varianty výpočtov

Vzhľadom k tomu, že je sledovaný vzájomný pomer rýchlostí medzi smyčkou priadze a obmedzovačom, je dôležitejšie uviesť tieto údaje (viď tab. 2.13).

V prvej variante (rovnaké otáčky obmedzovača a smyčky) sa sleduje prípad, keď sú otáčky obmedzovača a smyčky rovnaké. V tabuľke 2.12 nie je uvedená hodnota rýchlosti pre obmedzovač, pretože bola daná priamo po prepočte na uhlovú rýchlosť ako rovná uhlovej rýchlosti smyčky. Parameter p v rovnici (2.10) má hodnotu 0 a tak odpadá vplyv zložky smykového trenia v smere φ . Priadza nie je v tomto smere obmedzovačom ani poháňaná, ani brzdená.

Varianta 2 sa venuje možnosti, kedy sa obmedzovač otáča menšou rýchlosťou ako smyčka, čiže smyčku brzdí a tým pádom pôsobí smyková sila proti smeru pohybu priadze. Parameter p má hodnotu 1.

Stav, pri ktorom obmedzovač predbieha smyčku je analyzovaný v tretej variante výpočtu. Zložka smykovej sily pôsobí v smere pohybu priadze a smyčku tak poháňa. Hodnota parametra p je teda -1.

V tabuľke 2.14 sú uvedené výsledky všetkých troch simulácií.

	\mathbf{r}_{\max} [m]	\mathbf{F}_{\max} [N]
Varianta 1	0,0552	0,616
Varianta 2	0,0533	0,588
Varianta 3	0,0573	0,649

Tab. 2.14: Výsledky simulácií

Z analýzy vyplýva, že systém smykového dopriadania je možné prevádzkovať v dvoch režimoch: v prvom prípade (výpočtová varianta 3) obmedzovač smyčku predbieha, zatiaľ čo v druhom prípade sa obmedzovač otáča rýchlosťou nižšou než smyčka (výpočtová varianta 2). Pri variante 2 je oproti variante 3 hodnota maximálnej sily nižšia okolo 10% a maximálna hodnota polomeru je nižšia zhruba o 8%. Tento rozdiel nie je významný.

Teoreticky je možné zvoliť také otáčky obmedzovača, pri ktorých hodnoty uhlových rýchlostí smyčky a obmedzovača budú rovnaké. Týmto medzným prípadom, ktorý však v praxi nenastane, sme sa zaoberali vo výpočtovej variante 1.

Z konštrukčného hľadiska sú možné dve varianty pohonu obmedzovača. Buď má obmedzovač vlastný pohon, alebo je poháňaný prostredníctvom magnetickej spojky. Nevýhoda vlastného pohonu je hlavne vo väčšej konštrukčnej náročnosti a sú tam tiež vyššie finančné náklady spojené s nákupom elektrického pohonu. Tento samostatný pohon obmedzovača umožňuje upravovať jeho rýchlosť. Tým pádom je možné

prevádzkovať systém smyčkového dopriadania v režime, kedy sú maximálna hodnota ťahovej sily a maximálny polomer smyčky menšie (výpočtová varianta 2).

Na druhú stranu môže byť pohon obmedzovacieho telesa je prostredníctvom magnetickej spojky od vretena. Tým je celý systém z konštrukčného hľadiska jednoduchší, aj keď výsledky (tab. 2.14) ukazujú, že maximálny polomer a maximálna ťahová sila sú väčšie (výpočtová varianta 3).

Magnetické spojky slúžia na bezkontaktný prenos krútiacich momentov – aj cez steny všetkého druhu (okrem železných) [2]. Skladajú sa z dvoch protíľahlých nábojov, ktoré sú osadené silnými magnetmi. Krútiaci moment, ktorý potom pôsobí na náboj sa automaticky preniesie cez vzduchovú medzeru na druhý náboj spojky. Krútiaci moment je možné zvýšiť zmenšením vzduchovej medzery.

Výhodou je bezkontaktné prenášanie krútiaceho momentu, žiadny fyzický kontakt medzi hnacími a hnanými dielmi, ochrana proti preťaženiu až 110%, ďalej elektrická, mechanická, chemická izolácia a prevádzková teplota do 140 °C.

2.4.6 Analýza vplyvu zmeny polomeru navíjania pre rôzne jemnosti

Táto analýza naväzuje na analýzu uvedenú v kap. 2.3.1 a kap. 2.3.2. V tomto prípade bude skúmané, ako sa prejaví v systéme smyčkového dopriadania zmena jemnosti vypriadanej priadze. Vstupné hodnoty zodpovedajú vstupným hodnotám uvedeným v kap. 2.3.1 a 2.3.2. Cieľom analýzy je určenie závislosti maximálneho polomeru smyčky a maximálnej ťahovej sily na polomere navíjania pre rôzne jemnosti priadzí.

Výsledky analýz sú uvedené v tab. 2.15, 2.16 a na obr. 2.23 a 2.24.

	r_{\max} [m]			
r_n [mm]	7 tex	10 tex	13 tex	16 tex
9	0,0440	0,0463	0,0481	0,0494
11	0,0472	0,0498	0,0517	0,0531
13	0,0506	0,0533	0,0553	0,0569
15	0,0539	0,0569	0,0591	0,0607
17	0,0573	0,0605	0,0628	0,0646

Tab. 2.15: Výsledky pre zmenu polomeru navíjania a rôzne jemnosti – r_{\max} [m]

	F_{\max} [m]			
r_n [mm]	7 tex	10 tex	13 tex	16 tex
9	0,141	0,223	0,312	0,406
11	0,167	0,266	0,372	0,482
13	0,197	0,312	0,436	0,566
15	0,228	0,361	0,505	0,655
17	0,261	0,414	0,578	0,749

Tab. 2.16: Výsledky pre zmenu polomeru navíjania a rôzne jemnosti- F_{\max} [N]

Závislosť maximálnej hodnoty polomeru smyčky závisí na polomere navíjania lineárne s rôznou smernicou pre danú jemnosť priadze. Ďalej je možné konštatovať, že táto hodnota sa zvyšuje s rastúcou jemnosťou priadze, pričom prírastok hodnoty sa postupne znižuje. Túto závislosť je možné veľmi presne aproximovať napr. polynómom tretieho stupňa. Veľkosť rotujúcej smyčky ovplyvňuje rozteč vretien a tým konštrukciu dopriadacieho stroja. Maximálna hodnota ťahovej sily v priadzi rastie s polomerom navíjania kvadraticky, pretože sa súčasne zvyšujú otáčky smyčky počas procesu navíjania. Kvadratická závislosť ťahovej sily na otáčkach rotujúcej priadze je známa u voľného balónovania priadze.

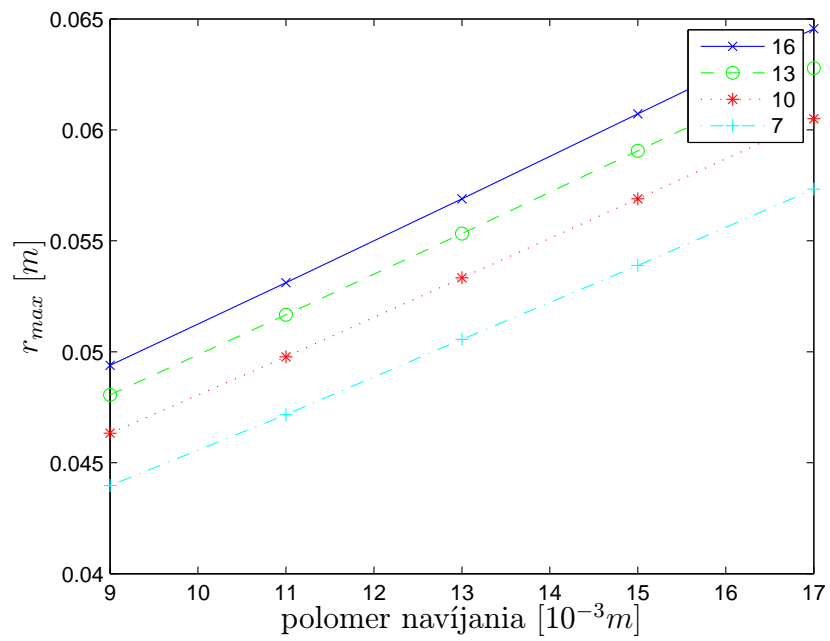
2.4.7 Teoretické maximálne otáčky vretena a obmedzovača

Cieľom tejto analýzy je stanovenie teoretickej maximálnej prevádzkovej rýchlosti zariadenia pre vretenové pradenie bez ohľadu na mechanické uloženie a pohon vretien. Kritériom pre stanovenie tejto rýchlosti je iba pevnosť navíjanej priadze.

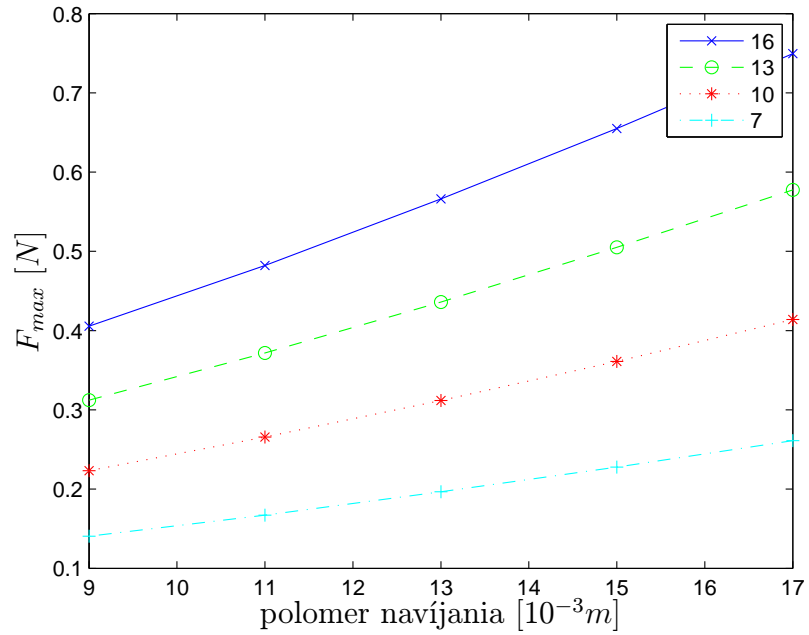
Analyzovaný model má vstupné hodnoty rovnaké ako simulácie popisované v kapitole 2.4.5.

Rovnako, ako u ostatných simulácií, je aj v tomto prípade sledovaná zmena maximálneho polomeru smyčky a zmena maximálnej ťahovej sily v závislosti na otáčkach vretena. Hodnota maximálnej rýchlosti vretien, pri ktorej je ešte bezpečné prevádzkovať zariadenie, bude určená z týchto hodnôt.

V nasledujúcej tabuľke 2.17 sú uvedené výsledky analýz. V súčasnosti pracuje zariadenie pri rovnakých otáčkach vretena a obmedzovača, preto bolo zvolené toto nastavenie.



Obr. 2.23: Závislosť maximálneho polomeru smyčky na polomere navíjania



Obr. 2.24: Závislosť maximálnej ťahovej sily na polomere navíjania

otáčky vretena [ot/min]	r_{\max} [m]	F_{\max} [N]
30000	0,0574	0,303
40000	0,0575	0,539
50000	0,0575	0,842
60000	0,0574	1,211
70000	0,0574	1,649
80000	0,0574	2,154

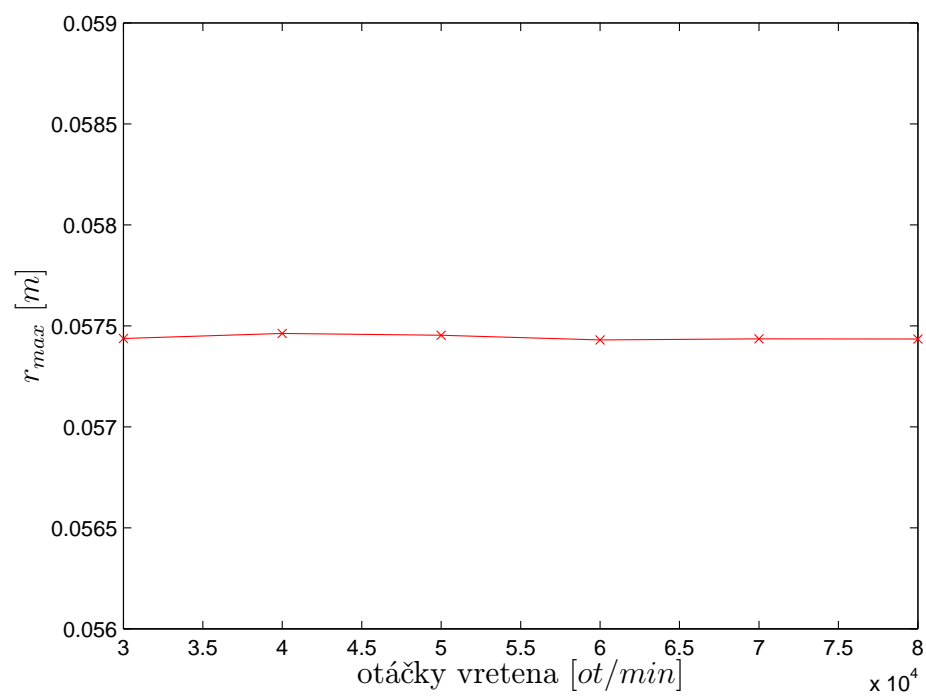
Tab. 2.17: Výsledky analýz

Na obrázku 2.25 a 2.26 sú prezentované výsledky analýz. Z výsledkov pre maximálny polomer smyčky vyplýva, že r_{\max} je nezávislé na otáčkach vretena, čím sa vlastne potvrdzuje teória známa z voľného balónovania [6]. Malé rozdiely medzi hodnotami sú spôsobené použitými matematickými metódami.

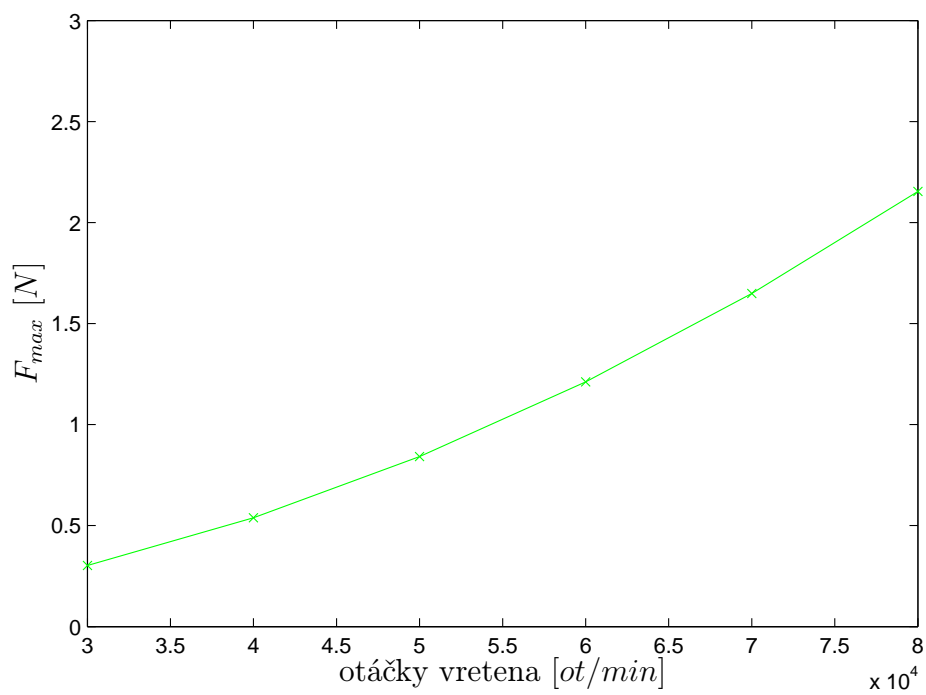
Z výsledkov závislosti medzi F_{\max} a otáčkami vretien je zrejmé, že ide o kvadratickú závislosť. To znamená, že ťahová sila rastie pri zanedbaní tiažovej sily s druhou mocninou otáčok vretena. Tento fenomén bol tiež popísaný u klasického voľného balóna [6].

Relatívna pevnosť priadze sa pohybuje podľa [15] v intervale 0,11–0,23 N/tex. Teoretická pevnosť modelovanej priadze je teda zhruba v rozsahu 1,8–3,8 N. To je maximálna hodnota, ktorá vedie k prietrhu priadze. V skutočnosti je hodnota, pri ktorej je z hľadiska prietrhu ešte bezpečné prevádzkovať zariadenie, nižšia a je závislá na konkrétnych prevádzkových podmienkach, vlastnostiach predkladaného materiálu napr. na variačnom koeficiente pevnosti priadze.

Ako môžeme vidieť na obr. 2.26, hodnota pevnosti priadze je dosiahnutá pri otáčkach vretena zhruba 80000 ot/min. V súčasnosti pracuje zariadenie pre smyčkové dopriadanie pri otáčkach 30000–40000 ot/min. To znamená, že z hľadiska pevnosti priadze o danej jemnosti je určitý priestor pre zvýšenie pracovnej rýchlosti za predpokladu, že bude k dispozícii vreteno pro zvýšené otáčky.



Obr. 2.25: Závislosť maximálneho polomeru smyčky na otáčkach vretena



Obr. 2.26: Závislosť maximálnej ťahovej sily na otáčkach vretena

2.5 Výsledky analýz a návrhy na optimálne prevádzkovanie zariadenia

Zvyšovanie výkonu stroja je ovplyvnené celou radou faktorov. Pri skúmaní procesu prstencového pradenia a zosúkania narážame na nasledujúce hranice ďalšieho zvyšovania výkonov prstencových strojov:

- mechanické namáhanie priadze
- tepelné namáhanie priadze
- mechanické a tepelné namáhanie bežca
- prípustné balónovanie priadze
- prípustné otáčky vretien

Zabudovaním obmedzovačov balóna a ich ďalším vývojom bola jedna z týchto hraníc, a to prípustné balónovanie priadze, čiastočne odstránená. Balónovanie priadze úzko súvisí s optimálnou roztečou vretien, ktorá ovplyvňuje produkciu stroja na jednotku zastavanej plochy. Veľkosť balóna závisí okrem iného na ťahu priadze, ktorého hodnota je obmedzená pevnosťou priadze.

Pri navíjaní vzniká v priadzi ťahová sila, ktorej veľkosť je daná fyzikálnymi závislosťami. Parametre, ako je výška balóna, priemer prstenca, hmotnosť bežca, počet otáčok bežca, jemnosť priadze, počet a tvar obmedzovačov, ovplyvňujú určitým, ale pritom úplne rozdielnym spôsobom nastavujúcu sa ťahovú silu v priadzi. Dochádza tak k mechanickému namáhaniu priadze, ktoré sa zväčšuje s rastúcimi otáčkami vretien.

Pri klasickom prstencovom dopriadaní prichádza priadza pri svojom pohybe od podávacích valčekov k cievke na viacerých miestach do styku s niektorými elementami celej sústavy prstenec- bežec: s vodičom priadze, s obmedzovačom balóna, bežcom a ojedinele i s prstencom. Pritom dochádza vplyvom mechanického trenia a tepla, vzniknutého trením, k určitému poškodeniu vlákien v priadzi. Tento jav sa prejavuje výraznejšie pri vyšších rýchlostiach pohybu priadze hlavne pozdĺž obmedzovača balóna, kde sa môžu objaviť teploty zashujúce do oblasti zmäkčovania, prípadne tavenia, čo sa týka priadzí zo syntetických materiálov. Tepelnému namáhaniu priadzí je možné čiastočne predchádzať použitím iného tvaru obmedzovačov

balóna, voľbou iných materiálov menovaných strojných elementov a ich povrchovou úpravou apod.

Celkový stav nevyváženosti cievky spôsobuje, že pri vysokých otáčkach môžu vznikať v uložení vretien veľké sily, ktoré majú za následok zodpovedajúce neprípustné hladiny vibrácií a hluku, ako aj vysoký príkon, čo je tiež príčinou obmedzenia počtu otáčok.

Ďalší veľmi dôležitý faktor, ktorý obmedzuje zvyšovanie výkonu prstencových strojov, je mechanické a tepelné namáhanie bežca a prstenca. Pri vysokých obvodových rýchlostiach dochádza k nadmernému zahrievaniu a opotrebovaniu bežca, čo nutne vedie k jeho rýchlemu zničeniu. To znamená, že pri daných podmienkach existuje prípustná obvodová rýchlosť bežca, pri ktorej je zaručená jeho minimálna životnosť. V skúmanom systéme smyčkového dopriadania je tento obmedzujúci faktor odstránený a tým vzniká priestor pre ďalšie zvyšovanie výkonu zariadenia.

Moderné dopriadacie stroje sú vybavené krytmi návínou [3], ktoré slúžia na zníženie hlučnosti a udržanie vysokej kvality vypriadanej priadze priebežným čistením spriadacieho priestora. Kryt návínou obmedzuje silnú ventiláciu počas dopriadacieho procesu. Ventilácia je krytom návínou účinne usmerňovaná do uzavretého priestora v okolí rotujúceho vretena, pričom kryt bráni voľnej výmene vzduchu s okolím. Tým sa zamedzuje prisávanie statického vzduchu z okolia do oblasti vretena, jeho urýchľovaniu a naslednému tangenciálnemu rozfukovaniu do okolného prostredia. Prednosťou smyčkového dopriadania je v jeho podstate, ktorá spočíva v tom, že súoso s vretenom je uložený obmedzovač. Jeho vnútorný priemer je väčší než je priemer návínou a dĺžka je tiež väčšia než výška návínou. Navíjanie priadze na dutinku sa zahajuje v hornej časti dutinky a pohybom vretenovej lavice sa vytvára návín v tvare potáča. Návín sa vytvára v smere od vrcholu dutinky k jej päte vratnými pohybmi vretenovej lavice. Súčasne s vytváraním návínou sa zhotovená časť návínou postupne zasúva do rotujúceho obmedzovača. Tým sa minimalizuje ventilačný odpor a znižuje sa energetická spotreba vretena.

2.5.1 Zhrnutie výsledkov analýz

Ak sa pozrieme na systém smyčkového dopriadacieho zariadenia z hľadiska analýz urobených v kap. 2.3 a 2.4, dospejeme k týmto záverom:

1. V prípade smyčkového dopriadania rastie s polomerom navíjania maximálny

polomer smyčky aj maximálna ťahová sila. Táto závislosť je lineárna. U prstencového dopriadania maximálna ťahová sila v priadzi s rastúcim polomerom navíjania klesá kvadraticky, zatiaľ čo maximálny polomer balóna kvadraticky rastie so zväčšujúcim sa polomerom navíjania.

2. Maximálny polomer smyčky rastie s jemnosťou vypriadanej priadze. S rastúcou jemnosťou priadze rastie maximálna hodnota ťahovej sily u smyčkového dopriadania významne. Ťahová sila je daná priamo otáčkami vretien a môžeme ju regulovať len zmenou týchto otáčok. Smyčkové pradenie má určitú nevýhodu oproti prstencovému pradeniu, u ktorého je možné voľbou bežca ovplyvniť pri daných otáčkach vretien hodnotu ťahovej sily.
3. Maximálny polomer balónujúcej priadze ani maximálna ťahová sila v priadzi sa so zmenou počtu zákrutov výrazne nemení ani u smyčkového ani u prstencového dopriadania. Najvýraznejší rozdiel hodnôt maximálnej ťahovej sily je pri prstencovom dopriadaní, kde sa ale so zväčšujúcim zákrutovým koeficientom rozdiely v náraste jednotlivých hodnôt ťahových síl znižujú. To znamená, že čím je zákrutový koeficient vyšší, tým menej sa hodnoty ťahových síl menia.
4. Zmena geometrických parametrov obmedzovača (priemer hornej valcovej časti, dĺžka valcovej časti) nemá na maximálny polomer smyčky a maximálnu ťahovú silu výrazný vplyv.
5. Veľkosť vysunutia statického prstenca nemá výrazný vplyv na maximálny polomer a maximálne ťahové sily v priadzi, takže nemá význam ho používať.
6. Pri použití statického prstenca je výhodnejšie použiť povrch s vyšším koeficientom trenia.
7. Hodnoty maximálneho polomeru smyčky aj maximálnej ťahovej sily sú pre nový tvar obmedzovača o málo väčšie než pri použití pôvodného tvaru. Je nutné ale uvážiť tvarovú zložitosť pôvodného obmedzovacieho telesa. Rozdiel v hodnotách maximálneho polomeru smyčky a maximálnej ťahovej sily je taký malý, že je možné považovať zjednodušenie tvaru obmedzovača z konštrukčného hľadiska za výhodnejšie.

8. Systém smyčkového dopriadania je možné prevádzkovať v dvoch režimoch – buď smyčku predbieha obmedzovač alebo naopak. Rozdiel v maximálnych polomeroch smyčky a maximálnych ťahových silách nie je významný, je však nutné brať do úvahy, že pri veľkom rozdieli otáčok je priadza výrazne mechanicky zaťažovaná. Ďalej je potrebné uvážiť, že pri prevádzkovaní v režime, keď sa obmedzovač otáča menšou rýchlosťou ako smyčka, je potrebný samostatný pohon obmedzovača, čo zvyšuje konštrukčnú náročnosť systému. Prevádzkovanie v režime, keď sú otáčky smyčky a obmedzovača rovnaké, je teoreticky možné, v praxi však nereálne.
9. Závislosť maximálnej hodnoty polomeru smyčky závisí na polomere navíjania lineárne s rôznou smernicou pre danú jemnosť priadze. Táto hodnota sa zvyšuje s rastúcou jemnosťou priadze, pričom prírastok hodnoty sa postupne znižuje. Veľkosť rotujúcej smyčky ovplyvňuje rozteč vretien a tým konštrukciu dopriadacieho stroja. Maximálna hodnota ťahovej sily v priadzi rastie s polomerom navíjania kvadraticky, pretože sa súčasne zvyšujú otáčky smyčky počas procesu navíjania. Maximálny polomer smyčky je konštantný s rastúcimi otáčkami smyčky pri danom polomere navíjania.
10. Rovnako, ako u prstencového dopriadania, je aj u smyčkového dopriadania maximálny polomer smyčky nezávislý na otáčkach vretena pri konštantnom polomere navíjania. Maximálna ťahová sila rastie s otáčkami vretena kvadraticky, čo je tiež známe pri voľnom balónovaní priadze.
11. Z hľadiska pevnosti priadze je pri smyčkovom dopriadaní stále priestor na zvyšovanie prevádzkových otáčok.

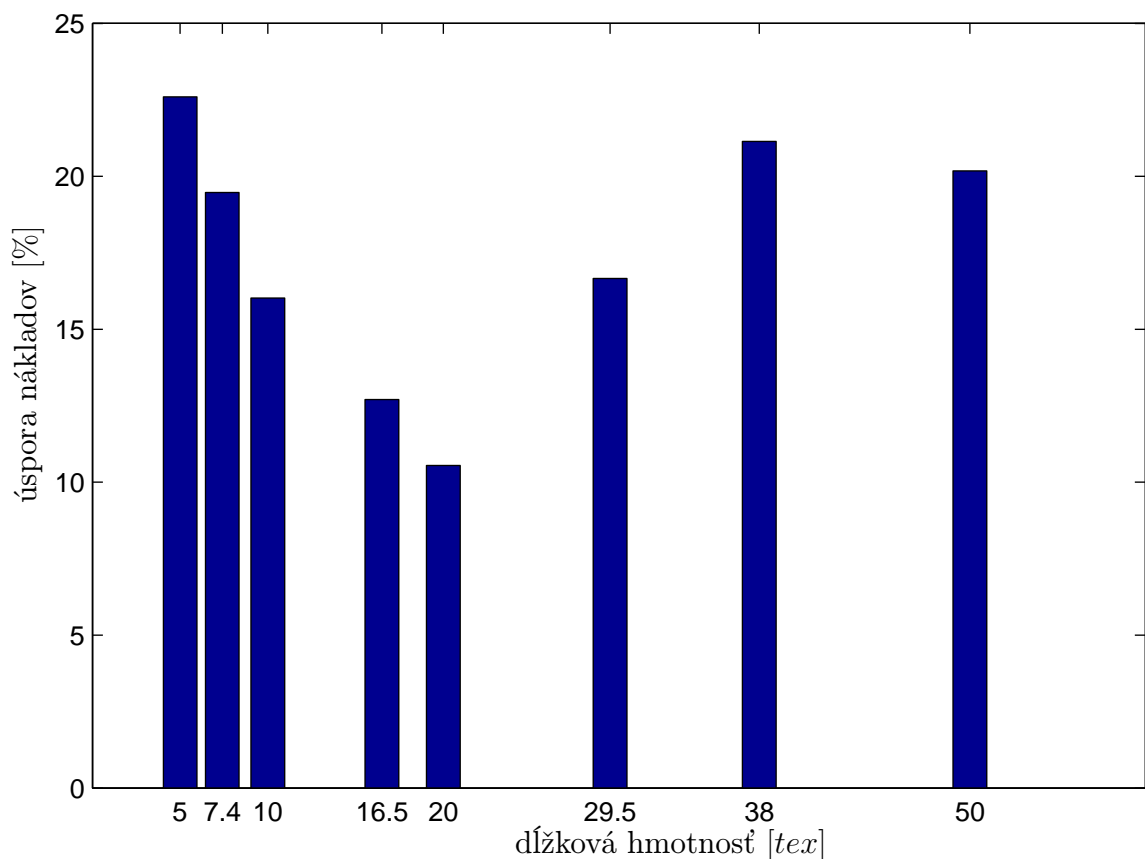
2.5.2 Doporučenia k optimálnej prevádzke zariadenia

Na základe urobenej rešerše a výsledkov analýz je možné doporučiť pre optimálnu prevádzku zariadenia pre smyčkové dopriadanie, aby bolo prevádzkované v režime, keď sú otáčky obmedzovača a vretena rovnaké. Ďalej sa doporučuje nepoužívať statický prstenec. V analýzach bolo ukázané, že jeho vplyv je na maximálny polomer smyčky a maximálnu ťahovú silu v priadzi minimálny. Analýzy navyše preukázali, že tvar obmedzovača, ktorý je v súčasnosti používaný, nie je potrebné nijak zásadne

upravovať, zmeny rozmerov totiž neprinášajú výrazné zmeny sledovaných parametrov. Vhodné je tiež používať navíjania na potáč tak, aby navinutá časť potáča bola zasúvaná do obmedzovača, čiže vretenová lavica sa nebude počas dopriadacieho procesu pohybovať smerom nadol, ale naopak.

2.5.3 Ekonomické aspekty

V práci [8] sú uvedené ekonomické efekty používania technológie smyčkového dopriadania. Vstupy boli získané konzultáciami s odborníkmi špičkovej prstencovej pradiarne, meraním dôb obslužných operácií, meraním spotreby energie jednotlivých funkčných častí, dopytom cien podľa technologických postupov, zabezpečením návratnosti vynaložených prostriedkov do 5-tich rokov a odborným odhadom zložitosti stroja. Z týchto údajov došli autori k záveru, že skutočná produkcia skúmaného systému je viac než dvojnásobná proti prstencovému dopriadaniu.

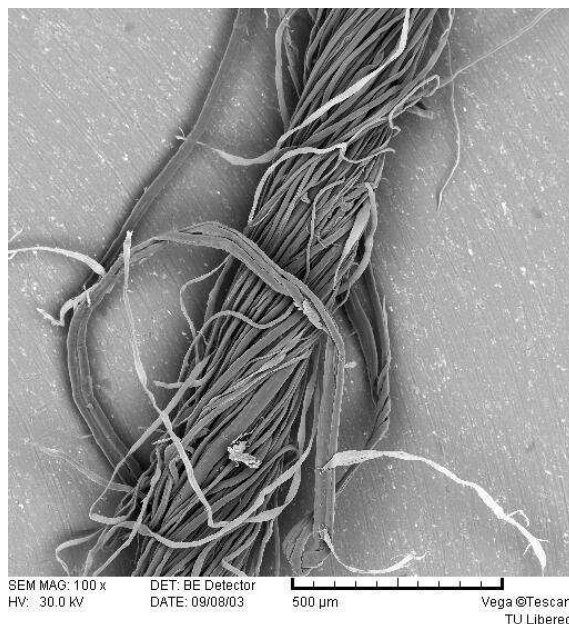


Obr. 2.27: Úspora nákladov [8]

Na základe tejto analýzy urobili porovnanie nákladov na operáciu dopriadania s výsledkom úspory nákladov v prospech smyčkového dopriadania o 11 až 22 % podľa vypriadaých dĺžkových hmotností uvedených na obr. 2.27.

2.6 Porovnanie vretenových a prstencových priadzí

V tejto kapitole sa venujme smyčkovému a prstencovému dopriadaniu vzhľadom k vlastnostiam priadzí vyrobených týmito technológiami. Všetky informácie a údaje sú čerpané zo správy, ktorú vypracovali Krupincová a Křemenáková [15].



Obr. 2.28: Vretenová zmesová priadza [15]

Priadza, vyrobená skúmanou spriadacou technológiou by mala vykazovať podobné vlastnosti ako priadze vyrobené štandardnými technológiami a cieľom spomínanej správy bolo overiť túto hypotézu.

Porovnávané priadze boli vyrobené na prstencovom dopriadacom stroji– prstencová priadza, na smyčkovom dopriadacom stroji– vretenová priadza (obr. 2.28) a boli porovnávané s priadzami rotorovými. Z hľadiska surovín majú skúmané priadze zhodné vlastnosti.

Pri porovnaní zmesových priadzí medzi sebou je možné skonštatovať tieto zhodné vlastnosti a odlišnosti:

Zhodné vlastnosti:

- Jemnosti, priemery a zákruty zmesových priadzí sú v rovnakej relácii. Zákrut rotorovej priadze je štandardne vyšší, napriek tomu sa v uvedených veličinách výrazne neprejavuje. Radiálne zaplnenie a radiálny hmotnostný podiel (vyšší podiel ľanu než vykazuje menovitý podiel) vykazujú tiež rovnaké výsledky.
- Chlpatosť zmesových priadzí vyrobených uvedenými technológiami je porovnateľná. Vretenová priadza dokonca vykazuje najnižšie hodnoty chlpatosti.
- Zaplnenie v priečnom reze sa experimentálne hodnotí z vlákenných plôch. Z dôvodu veľkej variability bolo zaplnenie určované z reálnych plôch vlákien priamou metódou. Výsledky ukazujú na takmer zhodné radiálne zaplnenia u vretenovej a prstencovej priadze. Radiálne zaplnenie rotorovej priadze je o málo nižšie, rozdiely však nie sú štatisticky významné.

Odlišné vlastnosti:

- Premiesenie komponent po priereze je podľa indexu miešania najhoršie u priadze vretenovej.
- Hmotná rovnomernosť a počty tenkých miest, hrubých miest a nopkov sú najhoršie u priadze vretenovej.
- Pevnosť a ťažnosť zmesových priadzí sa riadi podľa známych pravidiel technológie, najvyššiu pevnosť vykazuje priadza prstencová, o málo nižšiu pevnosť má priadza vretenová a najnižšia pevnosť je u priadze rotorovej.

V práci sú ďalej porovnané vlastnosti zmesových priadzí so súborom priadzí bavlnených. Výsledky ukazujú isté odlišnosti v jednotlivých vlastnostiach priadzí, čo môže byť spôsobené inou jemnosťou porovnávaných priadzí a tiež iným vstupným materiálom. Tieto výsledky sú dôležité pre následné porovnanie vlastností tkanín vyrobených ze smesových priadzí a priadzí zo 100% bavlny.

Pri porovnaní vlastností zmesových priadzí z bavlny a ľanu s priadzami 100% bavlnenými je možné povedať:

- Hodnoty chlpatosti a hmotnej rovnomernosti sú výrazne vyššie u zmesových priadzí.
- Nízky koeficient využitia pevnosti vlákien v priadzi je spôsobený horším usporiadaním dvoch kvalitatívne odlišných komponent v priadzi.

Z analýzy vyplynulo, že je možné touto technológiou vyrobiť zmesovú priadzu s podobnými vlastnosťami, aké majú zmesové priadze vyrobené prstencovou alebo bezvretenovou technológiou. Nový spôsob výroby je v mnohých ohľadoch výhodnejší, pretože je možné použiť vyššie rýchlosti dopriadania. Pri zvýšených rýchlostiach je možné vyrábať zmesovú priadzu z kotonizovaného ľanu, ktorý je klasickými spôsobmi dopriadania horšie spracovateľný. Bavlnené priadze majú vyššiu kvalitu, ale ich výroba je nákladnejšia. V porovnaní s čisto bavlnenými priadzami majú zmesové priadze niektoré vlastnosti odlišné. Pre určité účely použitia môžu byť vlastnosti zmesových priadzí postačujúce.

Celkovo je možné povedať, že je možné vyrobiť smyčkovou technológiou priadzu porovnateľnú s priadzou prstencovou. Priadza má však horšiu hmotnú rovnomernosť a horšie premiesenie komponent po priereze priadze. Malý pokles pevnosti oproti priadzi prstencovej sa vyskytoval aj u 100% bavlnených priadzí. Menej usporiadaná štruktúra zmesových priadzí vedie ku zmývaniu rozdielov medzi priadzami, ktoré sú preukázané u priadzí čisto bavlnených.

Autorky ďalej skúmali vplyv výrobnéj technológie použitej útkovej priadze na vlastnosti tkanín. Z výsledkov vyplýva, že technológia výroby útkovej zmesovej priadze nemá veľký vplyv na zisťované parametre zmesových tkanín. V tomto prípade sa viac uplatňuje vplyv úpravy tkaniny.

Kapitola 3

Experimentálna časť

3.1 Metodika verifikácie matematických modelov balónujúcej priadze

Niekedy je pre výzkum ale i prax nutné získavanie informácií o fungovaní rýchlo pohybujúcich sa častí, ktoré sú voľným okom nepostrehnuteľné. Na sledovanie, analýzu a následnú optimalizáciu týchto rýchlych dejov potrebujeme vhodné nástroje. V prípade balónujúcej priadze sa jedná o typický príklad rýchleho textilného procesu a vhodným nástrojom pre sledovanie je vysokorýchlostná kamera. Jej výhodou je, že skúmaný proces nijak neovplyvňuje. V prípade balónovania je systém totiž veľmi náchylný na akýkoľvek zásah (vrátane zmeny vlhkosti vzduchu).



Obr. 3.1: Kamera i-SPEED 2

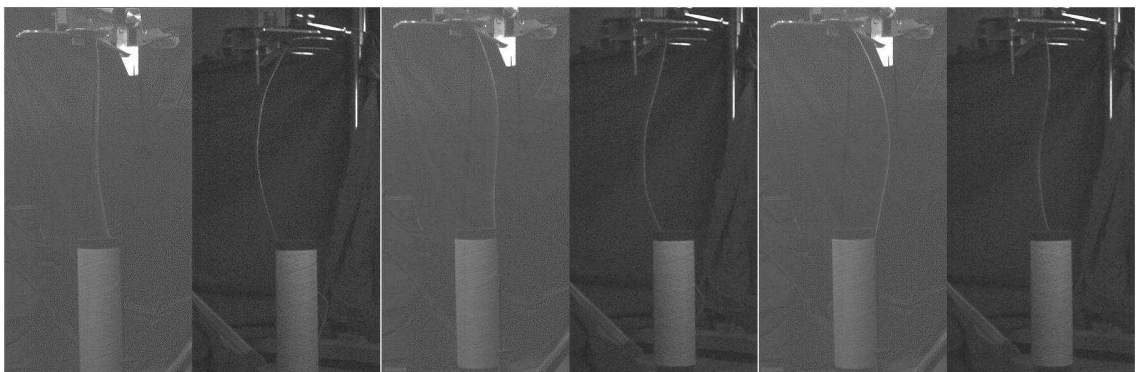
K snímaniu balónujúcej priadze sme použili kamery Olympus i-SPEED 2 (viď obr. 3.1). Kamera umožňuje ku každému snímku priradiť i hodnotu meraného signálu- v našom prípade ťahovú silu. Snímanie ťahovej sily je v tomto prípade

z dôvodu samotnej konštrukcie snímača komplikované. Vloženie snímača do dráhy tvoriacej sa priadze môže totiž spôsobiť jej prietrh.

Metodika bola vyvinutá pre verifikáciu procesu odvíjania priadze, hlavne v oblasti spracovania obrazu. Princíp tohoto prístupu je možné potom použiť aj pri skúmaní smyčkového dopriadania.

Dáta boli zaznamenané dvojicou vysokorýchlostných kamier Olympus i-SPEED 2, ktoré snímali priadzu z dvoch navzájom kolmých smerov. Takto bol zaznamenaný priestorový tvar balónujúcej priadze. Získané dáta predstavujú videosúbory vo formáte *.avi (bez komprimácie) obsahujúce sekvenciu snímok v rozlíšení 800×600 pixlov s farebnou hĺbkou 256 farieb. Video bolo zaznamenané rýchlosťou 300 snímok za sekundu (jeden snímok za 3,33 ms), doba expozície bola nastavená na $1/20$ tejto hodnoty (0,167 ms). Počas každého merania bolo zaznamenaných okolo 4000 snímok (cca 13,33 s) a veľkosť jednotlivých videosúborov je tak približne 1,8 GB.

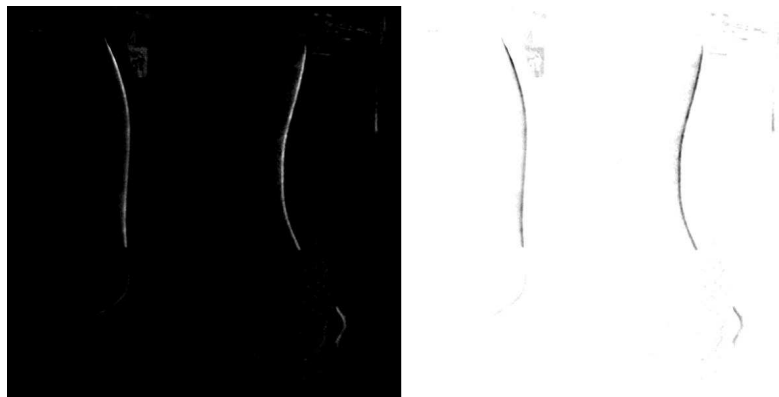
Pretože veľkosť videosúborov bola veľmi vysoká, prvým krokom bolo extrahovanie jednotlivých snímok a ich uloženie do bitmapových súborov vo formáte *.bmp. V ďalšom kroku boli snímky orezané na rozmer 300×600 pixlov, pretože cievka s balónujúcou priadzou sa vždy nachádzala v tomto výreze, a prevedené na stupne šedi (greyscale). Na uvedené operácie boli použité programy VirtualDub a IrfanView, ale je možné použiť ľubovoľné iné nástroje, prípadne zmeniť poradie operácií. Pre väčšiu prehľadnosť o procese boli príslušné snímky z obidvoch kamier spojené do jedného, aby bolo možné súčasne pozorovať nárys aj bokorys a získať tak lepšiu predstavu o správaní sa priadze (viď obr. 3.2).



Obr. 3.2: Tri po sebe nasledujúce snímky

Ďalším krokom bolo automatické nájdenie trajektórie priadze v jednotlivých snímkoch. Vzhľadom ku skutočnosti, že bitmapa v stupňoch šedi je vlastne matica, ktorej prvky predstavujú intenzitu svetlosti v danom snímku a vzhľadom k tomu, že priadza je svetlá a pozadie tmavé, bol použitý nasledujúci algoritmus.

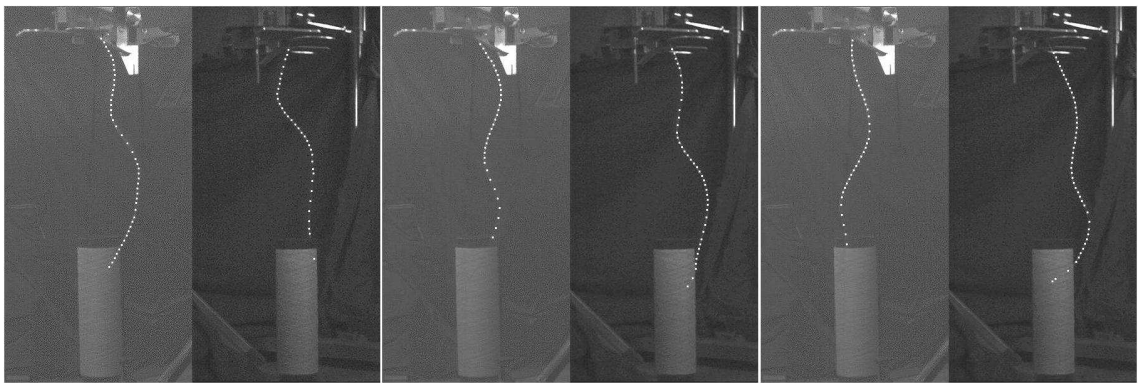
Ak označíme maticu s k -tým snímkom $A(k)$ a maticu s predchádzajúcim (resp. nasledujúcim) snímkom $A(k - 1)$ (resp. $A(k + 1)$), potom matica $D(k) = 2A(k) - A(k - 1) - A(k + 1)$ obsahuje kladné prvky v miestach, kde je snímok k svetlejší než okolité snímky, nulové prvky v rovnako svetlých miestach a prvky so zápornou hodnotou v miestach, kde je snímok k naopak tmavší. Samozrejme je vhodné pred alebo po výpočte rozdielu urobiť filtráciu šumu (napríklad priemerovaním), pretože rozdielom zašumených snímok je opäť šum. Ďalej je potrebné urobiť vyváženie stredných hodnôt snímok, aby rozdielom rôzne svetlých snímok vznikol snímok, ktorého stredná hodnota je nula.



Obr. 3.3: Bitmapa vytvorená porovnaním troch susedných snímok a jej negácia

Získané rozdielové snímky by bolo možné previesť na binárne obrazy a pre detekciu trajektórie použiť štandardné funkcie Matlabu a jeho Image Processing Toolbox. Ich použitie sa vďaka komplikáciám, ktoré sa v niektorých snímkoch vyskytujú (šum, prerušovaná trajektória, atd.), príliš neosvedčilo, a tak bol vytvorený vlastný algoritmus detekcie trajektórie priadze. Tento algoritmus vychádza z úvahy, že je známy horný bod trajektórie, ktorý sa nachádza vo vodiacom očku. Na určitom úseku kružnice so stredom v tomto bode je teda možné hľadať „najsvetlejšie” miesto. Ak má nájdená oblasť (ktorej rozmer korešponduje s priemerom priadze v pixloch) dostatočný odstup intenzity od okolitého šumu, je možné stred oblasti prehlásiť za bod trajektórie a hľadať ďalší bod v blízkosti práve nájdeného bodu. V takom prípade

sa opäť hľadá v určitej kruhovej výseči, ktorej os leží v smere skôr nájdených bodov. V prípade neúspechu sa polomer prehľadávanej oblasti zväčší a hľadá sa opäť z pôvodného bodu. Správne nastavenie použitých konštánt (napr. dĺžka kroku, veľkosť testovanej oblasti, odstup šumu) je otázkou experimentov so skupinou testovacích snímkov. V oblasti medzi očkom a horným okrajom cievky tento algoritmus rozpozná priadzu veľmi spoľahlivo. Podstatne horšie si algoritmus poradí pri detekcii trajektórie v oblasti cievky, kde rozdielové snímky obvykle neposkytujú vhodnú informáciu, pretože cievka je svetlá, priadza je tiež svetlá a rozdiel snímkov je na úrovni šumu (obr. 3.4).



Obr. 3.4: Body nájdené z rozdielových snímkov vyznačené v pôvodných snímkoch. Body nájdené na cievke sú skôr výsledkom náhody

Až do tohto okamihu bolo výhodné uvažovať súradnice v pixloch, predovšetkým kvôli jednoduchšej manipulácii s maticami a možnosti počítať s celými číslami, čo obvykle býva rýchlejšie. V nasledujúcich krokoch už nie je nutné pracovať priamo s obrazom, ale iba s nájdenými bodmi a tiež je potrebné vyjadriť súradnice trajektórie v metroch (respektíve v milimetroch). Za týmto účelom bola urobená dvojica kalibračných snímkov a odmerané niektoré dôležité rozmery.

Na prepočet súradníc bola použitá lineárna transformácia. Takúto transformáciu je možné pripustiť vzhľadom k tomu, že sledovaný dej sa vyskytuje hlavne uprostred snímku a jeho veľkosť je výrazne menšia, než zvolená vzdialenosť kamier od tohoto deja. Výhodou lineárnej transformácie je jednoduchosť jej použitia, kedy súradnice bodu $\mathbf{p}[u; v]$ v pixloch prepočítame na súradnice bodu $\mathbf{m}[x; y]$ v milimetroch prostým vynásobením transformačnou maticou $\mathbf{T}(3 \times 3)$. Prepočet opačným smerom

urobíme ľahko vynásobením inverznou maticou \mathbf{T}^{-1} (3.1).

$$\begin{aligned}\mathbf{m}_i &= \mathbf{T}\mathbf{p}_i \\ \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{p}_i &= \mathbf{T}^{-1}\mathbf{m}_i\end{aligned}\tag{3.1}$$

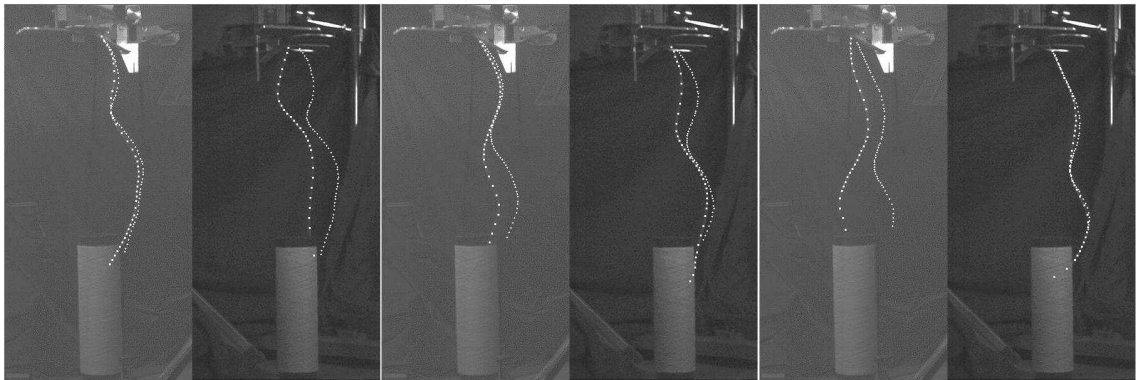
Samozrejme, transformácia musí byť aplikovaná na každú polovicu dvojsnímku zvlášť a pre každú polovicu dvojsnímku musí byť nájdená vlastná transformačná matica. Neznáme prvky matice T_{11} až T_{23} , ktoré charakterizujú posun, rotáciu a skosenie, je možné vypočítať z kalibračných bodov, u ktorých poznáme súradnice v pixloch aj v milimetroch. Pre výpočet šiestich neznámych teoreticky potrebujeme 3 kalibračné body (napríklad vodiace očko a rohové body cievky), ale väčšie množstvo bodov je vhodnejšie kvôli eliminácii prípadnej chyby pri získavaní súradníc týchto bodov. Ak máme k dispozícii n bodov, je možné vypočítať transformačnú maticu podľa vzťahov (3.2). Vzhľadom k tomu, že zostavená sústava lineárnych rovníc je preurčená, je pre výpočet koeficientov transformačnej matice použitá metóda najmenších štvorcov.

$$\begin{aligned}x_i &= T_{11}u_i + T_{12}v_i + T_{13} \\ y_i &= T_{21}u_i + T_{22}v_i + T_{23} \\ \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n & v_n & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_n & v_n & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ T_{21} \\ T_{22} \\ T_{23} \end{pmatrix} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{A}\mathbf{x} \\ \mathbf{x} &= (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{b} \\ \mathbf{e} &= \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Matica \mathbf{A} a vektor \mathbf{b} sú zostavené zo súradníc kalibračných bodov a obsahujú párny počet riadkov. Vektor \mathbf{x} obsahuje neznáme koeficienty lineárnej transformácie. Vektor \mathbf{e} poskytuje informáciu o chybe transformácie spätne aplikovanej na kalib-

račné body, jeho zložky v našom prípade iba výnimočne majú hodnotu vyššiu než 1 mm.

Súradnice trajektórií v jednotlivých poloviciach dvojsnímku slúžia k získaniu priestorových súradníc priadze. Za týmto účelom sa súbežne prechádza bodmi trajektórie získanými z obidvoch priemetov, podľa potreby sa lineárne interpolujú a získavajú sa tak ich priestorové súradnice, ktoré umožňujú vytvoriť priestorový tvar krivky balónujúcej priadze napr. na obr 3.6. Ak trajektória v jednom bode končí u horného okraja cievky, potom sú ignorované body z druhého pohľadu pod týmto okrajom. Zo získaných súradníc už nie je problém vypočítať meridián a použitím inverznej transformácie ho názorne vyznačiť do pôvodných dvojsnímkov (viď obr. 3.5). Na obr. 3.5 je viditeľný dvojité balón, oblasť zaškrtenia sa pohybuje smerom dolu, kde neskôr pravdepodobne zavadí o horný okraj cievky.

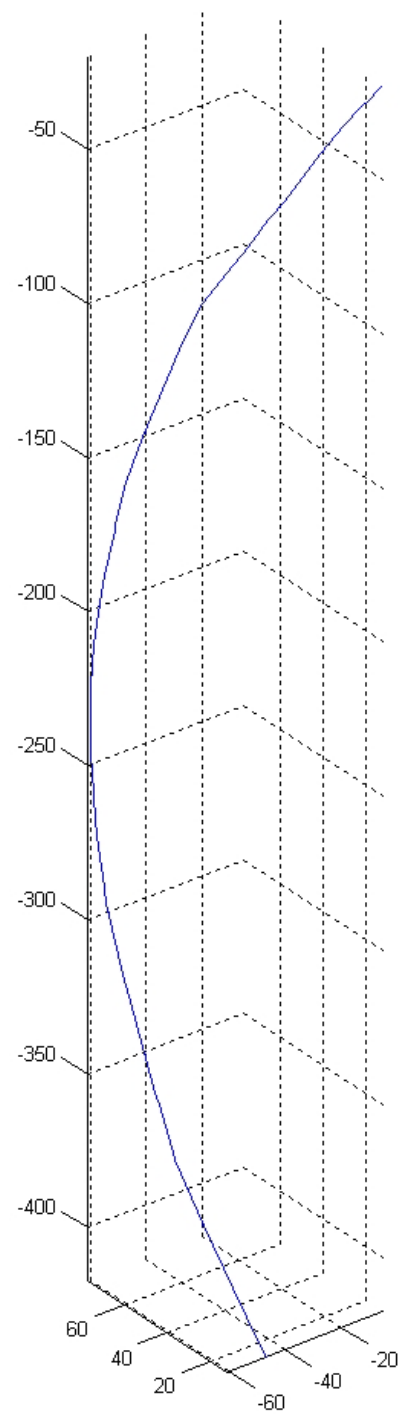


Obr. 3.5: Slabo vyznačený meridián v pôvodných záberoch

Vzhľadom k výskytu zle určených bodov (predovšetkým v oblasti cievky), sa ponúka použitie optimalizácie vychádzajúce z porovnania polohy troch priestorových kriviek, ktoré v čase nasledujú po sebe. Pokiaľ sa poloha niektorého bodu krivky, ktorá leží v časovej oblasti uprostred medzi ďalšími dvoma krivkami, výrazne odchýľuje od predpokladanej aproximácie okolných kriviek, bude taký bod ignorovaný.

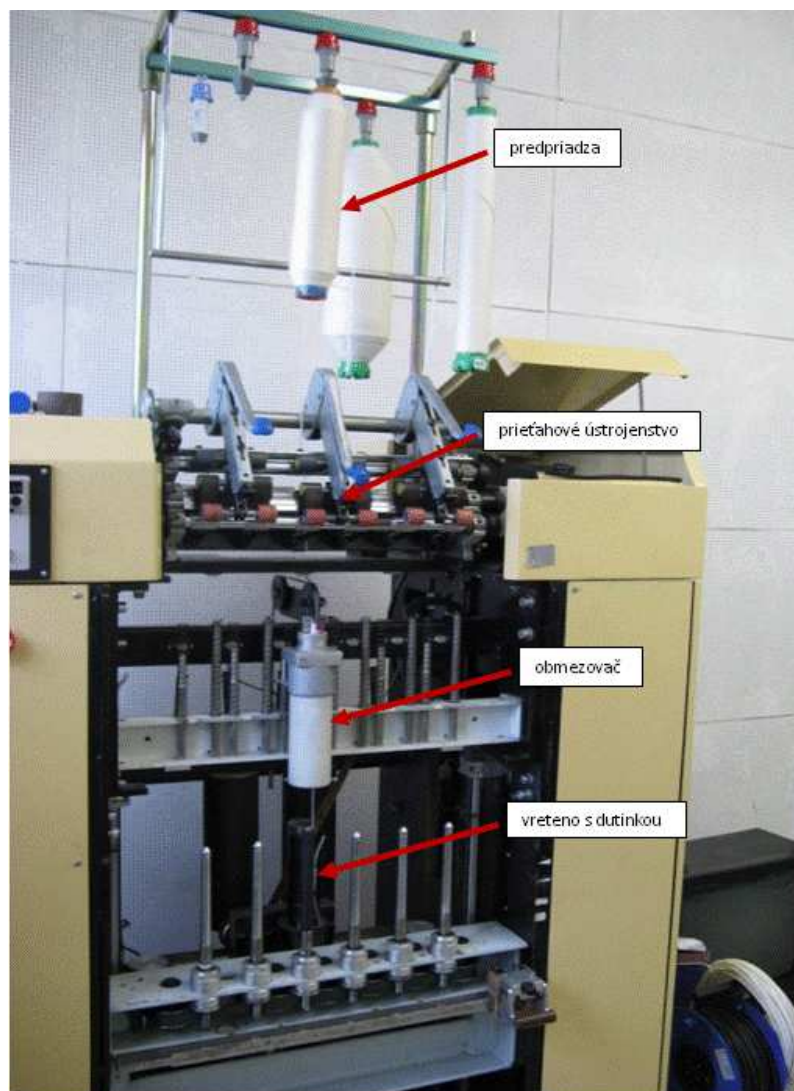
3.2 Overenie zostavených modelov

Na verifikáciu matematických modelov smyčkového dopriadania boli navrhnuté dva spôsoby. Prvým spôsobom je porovnanie tvaru krivky balónujúcej priadze, ktorá sa vytvára počas procesu tvorby priadze. Druhým spôsobom je kontrola priebehu



Obr. 3.6: 3D rekonštrukcia tvaru odvíjanej priadze

osovej ťahovej sily v priadzi vo vhodnom mieste spriadacej línie. Pri získavaní verifikačných dát však vznikajú problémy. Sledovať kompletný tvar priadze pri procese jej vytvárania od vodiacieho očka až po miesto navíjania na cievku nie je prakticky možné. Priadza prechádza vnútro rotujúceho obmezovača, ktorý je z bezpečnostných dôvodov umiestnený v nepohyblivom púzdre. Z tohoto dôvodu je sledovaná iba smyčka balónujúcej priadze v mieste, kde priadza opúšťa obmezovač a je navíjaná na cievku.



Obr. 3.7: Funkčný model smyčkového dopriadania

Sledovanie priebehu osovej ťahovej sily je ešte komplikovanejšie nielen z konštrukčných dôvodov, ale tiež preto, že zákruty sú na priadzu vkladané postupne od

miesta navíjania a hrnú sa po priadzi smerom k prietahovému ústrojenstvu. Obmezovač pôsobí ako zákrutová brzda a výsledkom je malý počet zákrutov a teda malá pevnosť priadze v mieste možného merania ťahovej sily. Jediné možné miesto merania sa nachádza medzi priadzovým očkom a prietahovým ústrojenstvom, kde priadza nevytvára balón.



Obr. 3.8: Usporiadanie prístrojov pri meraní

Ťahová sila sa bežne v priadzach meria tak, že sa do dráhy priadze vloží snímač, čím vzniká ďalšie trecie miesto a priadza je viac namáhaná. V našom prípade viedli všetky pokusy vložiť snímač ťahovej sily do dráhy priadze k prietru, preto sa od merania osovej ťahovej sily zatiaľ upustilo.

Pre verifikáciu matematického modelu procesu navíjania bola využitá vysoko-rýchlostná kamera i- SPEED 2 a následne metodika analýzy obrazu [22], popísaná v kap. 3.1.

3.2.1 Experiment

Experiment bol urobený na zariadení zobrazenom na obr. 3.7. Predpriadza je odvíjaná z cievky, vedená do prietahového ústrojenstva a potom skrz vodiace priadzové očko. Následne je stužka vlákien zakrucovaná prostredníctvom rotujúceho obmedzovača a navíjaná na dutinku nasadenú na drieku vretena. Na obr. 3.8 je vyobrazené umiestnenie kamery a svetiel. Je tu i snímač ťahovej sily, ktorý nebol nakoniec použitý. Balónujúca smyčka priadze vytvára prakticky rovinnú krivku a kamera ju snímala približne v ose vretena. Usporiadanie kamery priamo v ose vretena nie je technicky možné a nie je možné vyhnúť sa určitému skresleniu výsledkov.

Pohon rotujúceho obmedzovača je odvodený od rotujúceho vretena pomocou magnetickej spojky. Otáčky sú teda voliteľné iba pre vreteno. V nasledujúcej tabuľke 3.1 sú uvedené vstupné hodnoty, pri ktorých bolo urobené meranie. Počet zákrutov je označený Z a zákrutový koeficient am .

jemnosť [tex]	otáčky vretena [ot/min]	podávacia rýchlosť [m/min]	am [ktex ^{2/3} /m]	Z [1/m]
10	30000	24,9	56	1206
10	34000	28,2	56	1206
14,2	30000	29,7	60	1009
14,2	34000	33,7	60	1009
49	30100	42	96	717

Tab. 3.1: Hodnoty merania

Výsledkom merania bola sada videí (*.avi) pre rôzne vstupné hodnoty. Kamera ukladá ku každému videu súbor s príponou *.uda, kde sú uvedené parametre záznamu jednotlivých meraní.

Obraz smyčky priadze bol snímaný s frekvenciou 1000 snímok za sekundu (jeden snímok za 1 ms).

Parametre pre záznamy kamerou:

Speed = 1000fps
Shutter = 200x
Active sensor area = (800 x 600)
White bal = auto
Red gain = 1.88
Green gain = 1.00
Blue gain = 0.98
U gain = 1.74
V gain = 2.19
Enhance = on
DR Mode = Off
Trigger pos = 50%
Trigger edge = rising
ID Num = 1
Trigger frame = -1
Measurement calibration factor in pixels/mm = = 0.000000

3.2.2 Analýza obrazu

Analýzu získaných snímkov je možné urobiť pomocou programu, ktorý je dodávaný spoločne s kamerou, alebo využiť iný software. Pre našu aplikáciu je vhodnejšie použiť program pre určovanie tvaru balónujúcej priadze popísaný v kap. 3.1.

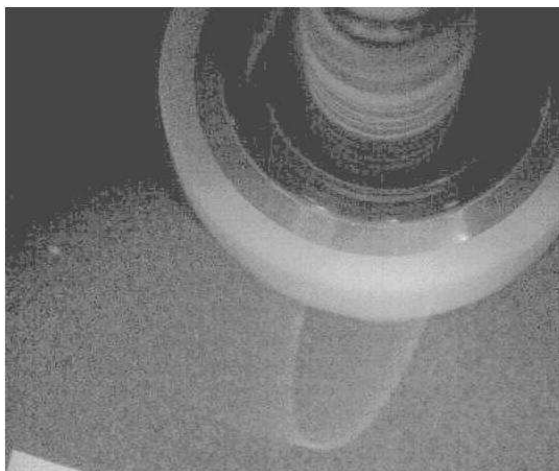
Tento algoritmus spočíva v rozložení videa na jednotlivé snímky, ktoré sa v prvom kroku prevedú z farebných na stupne šedi. Na obr. 3.9 je zobrazený jeden zo snímkov.

Podľa pôvodného algoritmu nasledovala identifikácia priadze na snímku pomocou programu vytvoreného v prostredí Matlab.

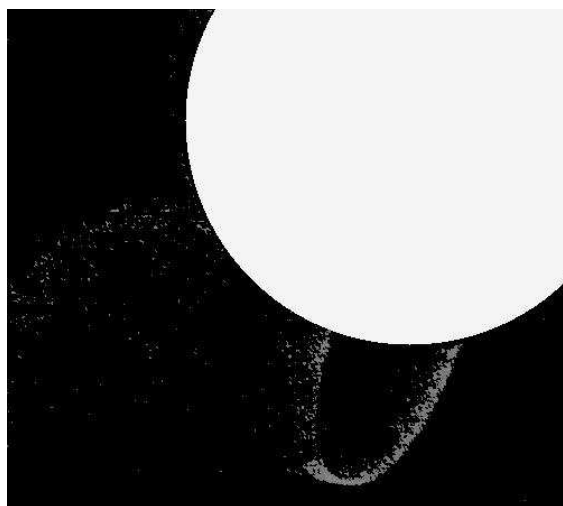
Pri spracovaní obrázkov pre priadzu o jemnosti 10 tex bolo možné identifikovať iba malú časť smyčky presahujúcej cez okraj obmezovača. Na pozadí obmezovača je vzhľadom k daným svetelným podmienkam priadzu obtiažné identifikovať. Pri analýze obrazu bol v tejto časti smyčky rozpoznávaný iba šum.

Z týchto dôvodov sme sa zamerali iba na analýzu snímkov pre jemnosti priadze 14,2 tex a 49 tex, kde polomer smyčky dosahuje vyšších hodnôt a väčšiu časť smyčky je možné bez problémov identifikovať. Lepšie podmienky pre analýzu sú dané i vyššou jemnosťou priadze. Výsledkom analýz je zistenie maximálneho polomeru smyčky a jej tvaru.

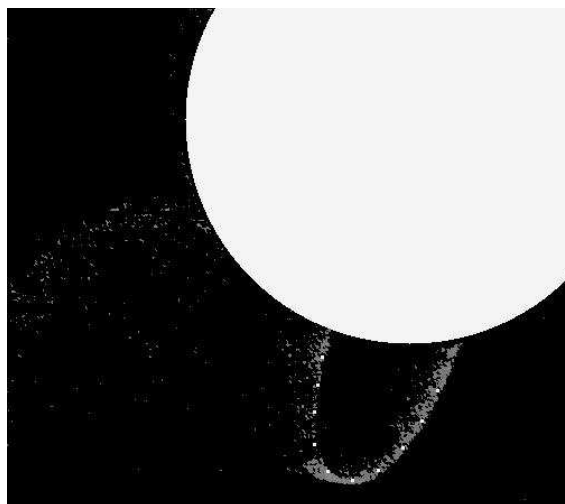
Na obr. 3.10 je vyobrazený snímok, ktorý je výsledkom úprav a je určený na hľadanie trajektórie priadze. Boli aplikované úpravy popisované v kap. 3.1. Podstatnú úlohu však hraje odstránenie šumu, pretože v prípade smyčkového dopriadania dochádza k vysokým rýchlostiam sledovanej časti priadze a tým pádom je zachytenie smyčky problematickejšie. Ďalším problémom je určenie, či v danom snímku sa priadza vôbec nachádza. Smyčka totiž pri dopriadaní rotuje okolo osi vretena a časť cyklu nie je kamerou zachytená.



Obr. 3.9: Snímok zo záznamu urobeného vysokorýchlostnou kamerou i- SPEED 2, jemnosť priadze 49 tex, 30100 ot/min

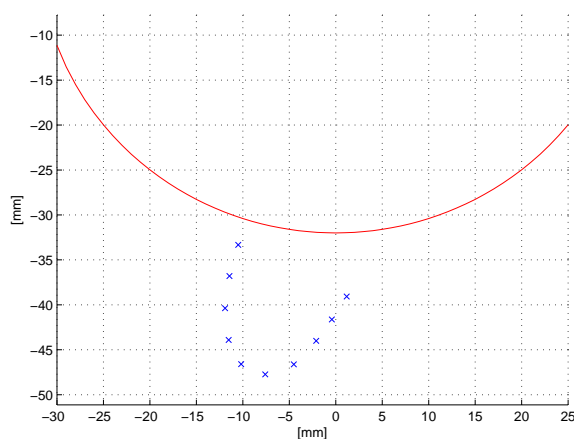


Obr. 3.10: Upravený snímok určený pre analýzu



Obr. 3.11: Nájdená trajektória priadze

Tvar smyčky s nájdenou trajektoriou pre jemnosť 49 tex sú zobrazené na obr. 3.11. Priemerný maximálny polomer smyčky bol transformáciami uvedenými v kap. 3.1 stanovený na 48 mm. Bolo nameraných 80 hodnôt a rozptylom 1,6 a 95%-ným intervalom spoľahlivosti rovným $48 \pm 0,4$ mm. Výsledok je zobrazený na obr. 3.12.



Obr. 3.12: Výsledok merania

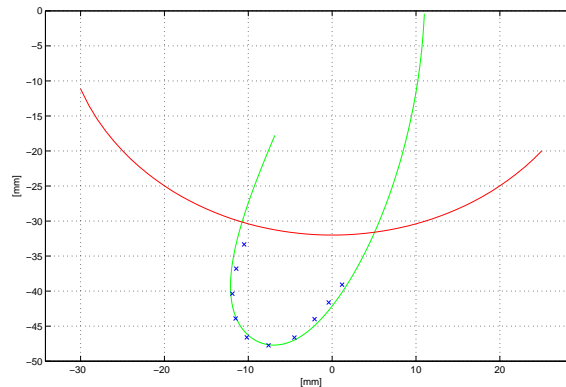
3.2.3 Simulácia pomocou počítačového modelu

Vyššie popísaná analýza obrazu slúži na verifikáciu vyvíjaných matematických modelov smyčkového systému dopriadania. Simulácia skúmaného procesu bola urobená na stacionárnom modeli s rovnakými vstupnými parametrami, ako meranie, tj. pre

jemnosť 49 tex a príslušné parametre z tab. 3.1. Maximálny polomer smyčky zo simulácie je 48,3 mm.

3.2.4 Porovnanie výsledkov

Na obr. 3.13 je do grafu so spracovanými výsledkami merania vložený výsledok simulácie. Z tohoto grafu vyplýva, že v časti, kde bolo možné identifikovať priadzu, tvar a polomer smyčky získaný z modelu a z analýzy obrazu vykazujú veľmi dobrú zhodu.



Obr. 3.13: Porovnanie výsledkov simulácie a merania

Z uvedených výsledkov vyplýva, že stacionárny model je na analýzu smyčkového dopriadania postačujúci, ak uvažujeme kvázistacionárny stav.

Kapitola 4

Ďalší postup riešenia

4.1 Teoretická časť

Na základe výsledkov experimentálneho overovania je možné konštatovať, že stacionárny model smyčkového dopriadania je v súčasnej podobe vyhovujúci.

Vzhľadom k nestabilite dynamického modelu bude nutná jeho revízia. Mali by byť navrhnuté a overené matematické metódy na riešenie daného problému a ďalej by bolo vhodné overenie samotného modelu. Je doporučené zvoliť vhodné konkrétne parametre spôsobujúce nestabilitu v smyčkovom dopriadaní a pomocou dynamického modelu ich následne analyzovať.

4.2 Praktická časť

V tejto fáze overovania modelu bola na základe obrazovej analýzy vykázaná významná zhoda stacionárneho modelu s reálnym meraním. Cieľom ďalšej práce by malo byť stanovenie metodiky merania druhej možnej veličiny–ťahovej sily v spriadanej priadzi. Ako už bolo napísané vyššie, doteraz viedli všetky pokusy k neúspechu. Po získaní hodnôt ťahovej sily v priadzi, a jej priradení ku konkrétnemu tvaru smyčky, by bolo možné presnejšie vyhodnotenie presnosti zostavených modelov.

Ďalej by mala byť sústredená pozornosť na overenie dynamického modelu, ktorého úlohou je hlavne skúmanie vplyvu nestabilít na systém dopriadania–zmena polomeru navíjania, rozbeh a zastavenie systému, zmeny v hmotovej nerovnomernosti priadze atď.

Záver

Systém smyčkového dopriadania patrí k novým dopriadacím spôsobom a jeho výhodou je odstránenie hlavného faktoru obmedzujúceho zvyšovanie výkonu u krúžkových dopriadacích strojov–bežca. Funkciu bežca v tomto prípade prevzalo obmedzovacie teleso. Priadza prechádza pri tvorbe jeho dutinou a pohybuje sa po jeho vnútornom povrchu. Rotáciou okolo pevnej osi vretena sa priadza zakrucuje. Ďalej je priadza navíjaná na potáč a tu sa ukazuje druhá výhoda použitia obmedzovacieho telesa. Pri navíjaní totiž môže byť návin na potáč urobený tak, že jeho navinutá časť je postupne zasúvaná do obmedzovača, čím dochádza k minimalizácii ventilačného odporu a tým sa znižuje energia potrebná na pohon vretena.

Cieľom predloženej dizertačnej práce bola analýza smyčkového dopriadania a na jej základe určenie možností optimalizácie vybraných parametrov systému. Bol zostavený stacionárny aj dynamický model pohybu priadze pri smyčkovom dopriadaní. Stacionárny model predpokladá kvazistacionárny stav a nerieši tak prípadné dynamické deje v systéme. Počas simulácie pomocou zostaveného dynamického modelu dochádza bohužiaľ k nestabilite pri modelovaní kontaktu priadze a obmedzovača a preto tento model nebol ďalej použitý pre analýzu skúmaného systému.

Z výsledkov analýz vyplýva, že z konštrukčného hľadiska je najvýhodnejšie použitie zjednodušeného tvaru obmedzovača bez jeho vlastného pohonu a bez statického prstenca. Výhodné je zaistiť pohon obmedzovača synchronizáciou otáčok s otáčkami vretena pomocou špeciálnej magnetickej spojky. Teoreticky je možné, vzhľadom k pevnosti priadze, zvýšiť pracovné otáčky zariadenia.

U smyčkového dopriadania nie je možné prakticky ovplyvniť ťahovú silu v priadzi ani maximálny polomer smyčky priadze, je totiž daná otáčkami smyčky a koeficientom smykového trenia medzi priadzou a obmedzovačom. Zaradením statického prstenca je možné ťahovú silu ovplyvniť len nepatrne.

Maximálna hodnota ťahovej sily v priadzi rastie s otáčkami smyčky a tým pá-

dom i s otáčkami vretien kvadraticky. Maximálny polomer smyčky je konštantný s rastúcimi otáčkami smyčky pri danom polomere navíjania.

Závislosť maximálnej hodnoty polomeru smyčky závisí na polomere navíjania lineárne a s rôznou smernicou pre danú jemnosť priadze.

V rámci analýz boli porovnané vybrané parametre u smyčkového a prstencového dopriadania. Z porovnania vyplýva, že u smyčkového dopriadania s rastúcim polomerom navíjania rastie maximálny polomer smyčky aj maximálna ťahová sila a táto závislosť je v oboch prípadoch lineárna. U prstencového dopriadania maximálna ťahová sila s rastúcim polomerom navíjania klesá a maximálny polomer balónujúcej priadze rastie s polomerom navíjania kvadraticky.

Systém smyčkového dopriadania umožňuje z technologickej stránky výrobu priadzí, ktoré sa svojími vlastnosťami blížia k vlastnostiam prstencových priadzí. U skúmaného systému je však možné dopriať vyššími rýchlosťami, čo znižuje náklady na ich výrobu.

Posledná časť predloženej práce sa zaoberá experimentálnym overením zostavených matematických modelov. Metodika bola vyvinutá pre prípad voľného balónovania priadze pri odvíjaní. Pre experimentálne overenie matematického modelu smyčkového systému dopriadania bola táto metodika upravená. Výsledky ukazujú veľmi dobrú zhodu medzi tvarom smyčky získaným pomocou stacionárneho modelu a reálnym tvarom smyčky získaným prostredníctvom rýchlokamery.

Ďalšie výsledky je možné očakávať po revízii dynamického modelu a následnom preskúmaní nestabilných stavov systému smyčkového dopriadania. To môže viesť k získaniu ďalších poznatkov o dynamickom správaní sa systému, resp. bude možné predikovať význam vplyvu jednotlivých hraničných situácií na celkovú stabilitu dopriadacieho systému. Rovnako môžu k štúdiu skúmaného systému prispieť ďalšie informácie o reálnych hodnotách ťahových síl v spriadanej priadzi. Na ich získanie však zatiaľ nebola vyvinutá vhodná metodika.

Literatúra

- [1] *Odpor prostředí* [online]. [cit. 2013-06-25]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_6>.
- [2] *Magnetické spojky* [online]. [cit. 2012-10-27]. T. E. A. Technik. Dostupné z: <<http://www.teatechnik.cz/magneticke-spojky-1/>>.
- [3] *Užitný vzor č. CZ 20673 (U1)* [online]. 2010. [cit. 2013-08-10]. Dostupné z: <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=CZ&NR=20673U1&KC=U1&FT=D&ND=3&date=20100331&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en_EP>.
- [4] BATRA, S. K. – GHOSH, T. K. – ZIEDMAN, M. I. An integrated approach to dynamic analysis of the ring spinning process: Part I: Without air drag and Coriolis acceleration. *Textile Research Journal*. Jún 1989, vol. 59, iss. 6, s. 309–317. ISSN 0040-5175.
- [5] BATRA, S. K. – GHOSH, T. K. – ZIEDMAN, M. I. An integrated approach to dynamic analysis of the ring spinning process: Part II: With air drag. *Textile Research Journal*. Júl 1989, vol. 59, iss. 7, s. 416–424. ISSN 0040-5175.
- [6] BERAN, J. Dynamic analysis of the ring spinning process. *Engineering MECHANICS*. 2005, vol. 12, iss. 6, s. 393–401. ISSN 1210-2717.
- [7] BERAN, J. – KRACÍK, V. *Simulation, analysis and optimalization of yarn winding and unwinding processing* [online]. [cit. 2009-01-20]. Dostupné z: <http://www.ksk.tul.cz/vz/dokumenty/VZ-MSM242100001/Poster_Beran.pdf>.

- [8] BLAŽEK, P. Cesty spřádání staplových vláken systémem průtah- vřeten. In *Textilie na prahu nového tisíciletí*, Liberec, 24. apríl 2002. Technická univerzita v Liberci.
- [9] FRASER, W. B. – GHOSH, T. K. – BATRA, S. K. On unwinding yarn from a cylindrical package. *Proceedings of the Royal Society A*. Marec 1992, vol. 436, 1898, s. 479–498. ISSN 1364-5021.
- [10] HEJNOVÁ, M. – BERAN, J. GUI Application on the Ballooning Yarn. In *Technical Computing Prague 2008*, s. 39, Praha, 11.november 2008. Humusoft s.r.o. ISBN 978–80–7080–962–0.
- [11] kolektív autorov. Numerická simulace vysokorychlostních procesů navíjení příze. Výskumná správa, Technická univerzita v Liberci, 2011.
- [12] kolektív autorov. Určenie súčiniteľa aerodynamického odporu vlákna v prúde vzduchu. Výskumná správa, Žilina, 1981.
- [13] KOVÁŘ, R. *Struktura a vlastnosti textilií 2* [online]. [cit. 2009–01–20]. Dostupné z: <<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-12-19/09-06-55.ppt#334,38,Variantyuplatněnípovrchovéhohotření>>.
- [14] KŘEMENÁKOVÁ, D. *Interní norma č. 12-108-01/01: Definice.Geometrické vlastnosti staplových přízí*. [online]. [cit. 2013–07–21]. Dostupné z: <http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/5Normy/IN\%2012-108-01_01.pdf>.
- [15] KŘEMENÁKOVÁ, D. – KRUPINCOVÁ, G. *Projektování vlastností přízí a plošných textilií Novaspín* [online]. 2004. [cit. 2010–01–15]. Dostupné z: <http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/1Projektovani/1.1_zaverecne_zpravy/\%B1.1.10\%5D.pdf>.
- [16] MIGUŠOV, I. I. *Mechanika textilnoj niti i tkani*. Moskva, 1980.
- [17] MOUČKOVÁ, E. *Předení: Základné technologické stupně: Dopřádání* [online]. [cit. 2009–09–22]. Dostupné z: <<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-09-22/11-30-03.pdf>>.

- [18] MOUČKOVÁ, E. *Předení: Základné technologické stupně: Nekonenční dopřádací systémy* [online]. [cit. 2009–01–21]. Dostupné z: <<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-09-22/11-35-34.pdf>>.
- [19] NECKÁŘ, B. *Příze a hedvábí 1* [online]. [cit. 2009–01–20]. Dostupné z: <<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2008-07-18/13-51-21.pdf>>.
- [20] POPOV, S. G. – KOL. Aerodynamičeskoe soprotivlenie tekstilnych nitej. *Tekstilnaja promyšlennost'*. 1962, vol. 4.
- [21] ROBERTSON, J. *Diamond-like amorphous carbon* [online]. [cit. 2013–08–19]. Dostupné z: <http://carbon.utsi.edu/downloads/JRobertson_MSER.pdf>.
- [22] SMOLKOVÁ, M. – BERAN, J. – KAŠŠE, J. Determination of the ballooning yarn curve with usage of image analysis. In *6th International Conference - TEXSCI 2007*, s. 193–194, Liberec, 5. – 7. jún 2007. Technická univerzita v Liberci. ISBN 978–80–7372–207–4.
- [23] URSÍNY, P. *Předení II.* [online]. 2001. [cit. 2013–06–25]. Dostupné z: <<https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2007-10-22/10-03-18.pdf>>.
- [24] WEISS, H. *Zur Dynamik geometrisch nichtlinearer Balken*. Chemnitz, 1999. 102 s. Doktorská práce na Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Vedúci doktorskej práce prof. Dr.-Ing. habil. Hans Dresig.

Zoznam publikovaných prác

SMOLKOVÁ, M.– BERAN, J.– KAŠŠE, J. Determination of the ballooning yarn curve with usage of image analysis. In *6th International Conference–TEXSCI 2007*, s. 193-194, Liberec, 5. – 7. jún 2007. Technická univerzita v Liberci. ISBN 978–80–7372–207–4.

SMOLKOVÁ, M.– BERAN, J. User Interface for Modelling of Ballooning Yarn. In *Mezinárodní konference studentů vysokých škol v Euroregionu Nisa*, s.203-206, Jelenia Góra, 15. – 16. máj 2008. Poland. ISBN 978–83–89863–87–4.

BERAN, J.– SMOLKOVÁ, M. Mathematical Model of Loop Spinning System. In *X. International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms*, s. 55-62, Liberec, 2. – 4. september 2008. ČR. ISBN 978–80–7372–370–5.

HEJNOVÁ, M.– BERAN, J. GUI Application on the Ballooning Yarn. In *Technical Computing Prague 2008*,s.39, Praha, 11.november 2008. ČR. ISBN 978–80–7080–962–0.

HEJNOVÁ, M.– BERAN, J. Analysis of the Loop Spinning System. In *Mezinárodní konference studentů vysokých škol v Euroregionu Nisa*, Jelenia Góra, 14. – 15. máj 2009. Poland. ISBN 978–83–61719–28–1.

HEJNOVÁ, M.– BERAN, J. Simulation and Analysis of the Loop Spinning System. In *7th International Conference TEXSCI 2010*, Liberec, 6. – 8. september 2010. ČR. ISBN 978–80–7372–638–6.

BERAN, J.– HEJNOVÁ, M. Analysis of the Loop Spinning System. In *Advances in Mechanisms Design. Proceedings of TMM 2012*, s. 383-392, Liberec 2012, ISBN 978–94–007–5124–8.